



## AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM SISTEMAS CA/CC EM PARALELO

Oscar Miguel Santacruz Silvero

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Glauco Nery Taranto  
Karen Caino de Oliveira Salim

Rio de Janeiro  
Março de 2017

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM SISTEMAS  
CA/CC EM PARALELO

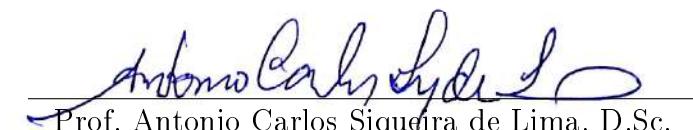
Oscar Miguel Santacruz Silvero

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:



Profa. Karen Caino de Oliveira Salim, D.Sc.



Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.



Prof. Sérgio Gomes Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2017

Silvero, Oscar Miguel Santacruz

Avaliação da Estabilidade a Pequenos Sinais em Sistemas CA/CC em Paralelo/Oscar Miguel Santacruz Silvero. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVI, 112 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Karen Caino de Oliveira Salim

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 106 – 109.

1. Elos de Corrente Contínua.
  2. Estabilidade a Pequenos Sinais.
  3. Análise Modal.
- I. Taranto, Glauco Nery *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Para Mirtha y Miguel Santacruz,  
mis padres, que me han dado  
todo y siguen dando.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

Ao apoio incondicional de todos meus familiares, em especial aos meus pais, Mirtha e Miguel, por serem os melhores pais que alguém pode ter, e a Gabriela, Noelia, Sofia, Paz e Oscarcito, presentes em todos os momentos vividos fora de casa.

Ao Prof. Glauco Taranto pela orientação, pela dedicação e cordialidade durante estes últimos dois anos. À Profa. Karem Salim pela coorientação e contribuição ao trabalho.

Aos colegas e grandes amigos ao longo deste curso, os engenheiros Alan Ferreira e Leander Rêgo.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas de Potência - LASPOT, Aline, Camilo, David, Hannah, Juliana, Leandro, Samuel, Tálita, Thassiana e Thiago.

Ao Programa de Engenharia Elétrica (PEE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) por oferecer um ensino público, gratuito e de qualidade. E a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE A PEQUENOS SINAIS EM SISTEMAS  
CA/CC EM PARALELO

Oscar Miguel Santacruz Silvero

Março/2017

Orientadores: Glauco Nery Taranto  
Karen Caino de Oliveira Salim

Programa: Engenharia Elétrica

No Brasil, os primeiros sistemas de transmissão em CC tem sido tradicionalmente construídos como interconexões assíncronas de sistemas CA. No entanto, com a entrada em operação dos bipolos associados ao complexo Belo Monte, a implantação se dará em paralelo com o sistema CA do Sistema Interligado Nacional.

Apresenta-se, nesta dissertação, uma análise de sistemas de transmissão de CC em paralelo com sistemas de CA sob a perspectiva da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência. São apresentados aspectos relacionados a representação linear e não-linear dos controles de elos de corrente contínua. Os estudos são realizados utilizando técnicas de análise modal para sistemas de potência, assim como, simulações lineares e não lineares no domínio do tempo. A teoria de pequenos sinais é empregada para identificar os modos de oscilação críticos, provenientes do elo CC, em detrimento da margem de estabilidade. As simulações mostram que, em sistemas elétricos fracos, caracterizado pela baixa relação de curto-circuito, um modo crítico proveniente do modo de controle de corrente do elo, pode ser responsável pelo desencadeamento de um processo de instabilidade de tensão.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## SMALL-SIGNAL STABILITY ASSESSMENT IN PARALLEL AC/DC SYSTEMS

Oscar Miguel Santacruz Silvero

March/2017

Advisors: Glauco Nery Taranto

Karen Caino de Oliveira Salim

Department: Electrical Engineering

In Brazil, the first DC transmission systems have traditionally been constructed as asynchronous interconnections of CA networks. However, with the start-up of the bipoles associated to the Belo Monte complex, the interconnection will take place in parallel with the AC system of the National Interconnected System.

In this dissertation, we present an analysis of DC transmission systems in parallel with AC systems from the perspective of small-signal stability of electric power systems. We present aspects related to linear and nonlinear representation of the DC link controls. The studies are performed using modal analysis techniques for power systems, as well as linear and nonlinear time domain simulations. The small signal theory is used to identify the critical modes of oscillation from the HVDC, in detriment of the stability margin. The simulations show that, in weak electrical systems, characterized by the low short-circuit ratio, a critical mode from the current control mode of the link may be responsible for triggering a voltage instability process.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	3
1.2 Revisão Bibliográfica . . . . .	4
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	8
<b>2 Transmissão em Corrente Contínua</b>	<b>10</b>
2.1 Introdução . . . . .	10
2.2 Características Básicas . . . . .	12
2.3 A Operação do Elo CCAT . . . . .	14
2.4 A Característica Estática do Controle . . . . .	16
2.5 Modelos de Controle do Elo CCAT . . . . .	17
2.6 Modelo de Controle do Elo CCAT <i>Built-in</i> do ANATEM . . . . .	20
2.6.1 Controle do bipolo . . . . .	21
2.6.2 Controle do polo . . . . .	24
2.6.3 Controle da ponte conversora . . . . .	26
2.7 A Relação de Curto-circuito . . . . .	29
2.8 A Característica do Elo CCAT no Âmbito de Pequenas Perturbações . . . . .	31
2.8.1 Estabilidade de sistemas elétricos de potência . . . . .	31
2.8.2 Estabilidade a pequenas perturbações e elos CCAT . . . . .	32
2.8.3 Representação do controle do elo CCAT em programas de estabilidade a pequenos sinais . . . . .	33
2.8.4 Estabilidade de tensão e bifurcações . . . . .	35
<b>3 Resultados e Discussões</b>	<b>37</b>
3.1 Sistema base . . . . .	37
3.1.1 Descrição do sistema base . . . . .	37

3.1.2	Desempenho dinâmico do sistema . . . . .	47
3.1.3	Análise de sensibilidade do modo crítico . . . . .	50
3.1.4	Influência da relação de curto-circuito - SCR . . . . .	58
3.1.5	Avaliação da atuação do controle de erro de corrente - CEC .	63
3.1.6	Bifurcação de Hopf . . . . .	69
3.2	Sistema Exemplo do ANATEM . . . . .	85
3.2.1	Variação do <i>setpoint</i> do elo CCAT . . . . .	87
3.2.2	Variação da linha de transmissão LT B2-B20 . . . . .	88
3.2.3	Variação da linha de transmissão LT B1-B10 . . . . .	89
3.2.4	Caracterização dos modos relacionados ao elo CCAT . . . . .	90
3.3	Rio Madeira - A opção híbrida . . . . .	93
3.3.1	Sistema Híbrido . . . . .	94
3.3.2	Sistema Híbrido - modificações . . . . .	96
3.3.3	Análise dos modos relacionados ao elo CCAT . . . . .	98
<b>4</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>103</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>106</b>
	<b>A Análise Modal</b>	<b>110</b>

# Listas de Figuras

2.1	Diagrama unifilar de um elo CCAT bipolar.	12
2.2	Círculo equivalente de um elo de corrente contínua em regime permanente.	14
2.3	Característica estática Vd-Id completa do controle.	16
2.4	Diagrama de blocos da estrutura básica do controle da ALSTOM.	18
2.5	Diagrama de blocos do controle do Elo CCAT.	20
2.6	Diagrama de blocos do controle de potência.	22
2.7	Diagrama de blocos do atraso de telecomunicação.	22
2.8	Diagrama de blocos do controle de sobrecarga de corrente - STOL.	23
2.9	Diagrama de blocos do limitador da ordem de corrente dependente da tensão - VDCOL.	24
2.10	Diagrama de blocos do amplificador de controle de corrente - CCA.	25
2.11	Diagrama de blocos do seletor de máximo para o $\alpha_{min}$ .	26
2.12	Modelo do oscilador controlado por tensão - VCO.	26
2.13	Diagrama de blocos do controle de $GAMMA_{min}$ e $A_{min}$ .	27
2.14	Diagrama de blocos do controle de erro da corrente - CEC.	28
2.15	Diagrama de blocos do limitador de alfa do integrador do retificador - RIAC.	29
2.16	Região de interesse da característica estática Vd-Id no âmbito de pequenas perturbações.	33
2.17	Diagrama de blocos do CCA e VCO em estudos de estabilidade a pequenas perturbações.	34
2.18	Diagrama de blocos do controle de potência em estudos de estabilidade a pequenas perturbações.	34
2.19	Diagrama de blocos do controle de $GAMMA_{min}$ e $A_{min}$ em estudos de estabilidade a pequenas perturbações.	35
2.20	Curva PV com as margens de estabilidade devido a BSN e BH.	36
3.1	Diagrama unifilar do sistema base.	38
3.2	Autovalores do sistema base.	41
3.3	<i>Mode shapes</i> de velocidade dos modos eletromecânicos.	42

3.4	Fatores de participação dos modos eletromecânicos. . . . .	42
3.5	Lugar das raízes do sistema base para a variação do ponto de operação com 4 CS (vermelho) e com 1 CS (azul). . . . .	44
3.6	Fatores de participação do autovalor crítico para o PO 9. . . . .	45
3.7	Lugar das raízes para o sistema base com LT interconexão 1 (vermelho), com LT interconexão 2 (azul) e barramento (verde). . . . .	45
3.8	Desvio de potência ativa para degrau de 1% na ordem de potência nos pontos de operação 6, 9 e 10. . . . .	48
3.9	Potência ativa e tensões CA da barra retificadora para falta monofásica. . . . .	49
3.10	Frequência das máquinas para falta monofásica nos pontos de operação. . . . .	49
3.11	Lugar das raízes para a modificação do ganho $K_a$ do regulador de tensão do compensador síncrono. . . . .	50
3.12	Lugar das raízes para a variação do ganho proporcional ( $K_p$ ) dos controles CCA dos retificadores do elo CCAT. . . . .	51
3.13	Lugar das raízes para a variação do ganho integral ( $K_i$ ) dos controles CCA dos retificadores do elo CCAT. . . . .	52
3.14	Lugar das raízes do sistema para os valores predeterminados (vermelho) e para os novos valores de $K_p$ e $K_i$ do CCA (azul). . . . .	52
3.15	Potência ativa para PO 9 para os valores predeterminados (vermelho) e para os novos valores de $K_p$ e $K_i$ (azul). . . . .	53
3.16	Lugar das raízes do sistema para o aumento do carregamento do sistema. . . . .	54
3.17	Lugar das raízes do sistema para a variação dos três parâmetros da LT interconexão a partir do PO 6. . . . .	55
3.18	Lugar das raízes para a ausência da dinâmica das máquinas ou do elo CCAT. . . . .	56
3.19	Lugar das raízes do sistema base com a inserção de barras infinitas. . . . .	58
3.20	Variação dos modos do sistema para o SCR da barra inversora com 1.54 (4 CS) e 1.24 (1 CS) para a variação de potência ativa do elo CCAT. . . . .	60
3.21	Variação dos modos do sistema com a variação do SCR da barra inversora. . . . .	61
3.22	Variação dos modos do sistema para o SCR da retificadora com 5.22 (azul), 4.56 (vermelho) e 4.06 (violeta) para a variação de potência ativa do elo CCAT. . . . .	62
3.23	Variação dos modos do sistema com a variação do SCR da barra inversora para distintos valores de SCR da retificadora. . . . .	62
3.24	Tensão CA da barra retificadora para o caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	64

3.25 Tensão CA da barra inversora para o caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	64
3.26 Corrente CC em um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	64
3.27 Ângulo de disparo $\alpha$ caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	65
3.28 Tensão CC da barra retificadora de um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	65
3.29 Tensão CC da barra inversora de um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	66
3.30 Ângulo $\alpha$ e $\alpha_{max}$ dos conversores inversores para o caso com CEC. . . . .	66
3.31 Ângulo $\alpha$ e $\alpha_{max}$ dos conversores inversores para o caso sem CEC. . . . .	67
3.32 Ângulo $\gamma$ e de comutação dos conversores inversores para o caso com CEC. . . . .	67
3.33 Ângulo $\gamma$ e de comutação dos conversores inversores para o caso sem CEC. . . . .	68
3.34 Potência ativa de um polo na condição de retificador para o caso com (vermelho) e sem (azul) CEC. . . . .	69
3.35 Aproximação (em azul) dos autovalores entre os PO 9 e 10. . . . .	70
3.36 Variação do ganho $K_a$ do RAT do compensador síncrono, a partir do novo PO 7. . . . .	71
3.37 Autovalores do sistema para o PO 7 modificado. . . . .	72
3.38 Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo <i>bumped</i> . . . . .	73
3.39 Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo <i>step</i> . . . . .	74
3.40 Tensões CA da barra inversora (B2) para diferentes ordens de referência do tipo <i>bumped</i> - vermelho (1 %), azul (5 %), verde (10 %), preto (15 %) e rosa (20 %). . . . .	75
3.41 Tensões CA da barra inversora (B2) para diferentes ordens de referência do tipo <i>step</i> - vermelho (5 %), azul (10 %), verde (15 %), preto (20 %) e rosa (25 %). . . . .	75
3.42 Tensões CA da barra inversora (B2) para os pontos de operação referidos e distúrbio do tipo <i>bumped</i> - com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	77
3.43 Tensões CA da barra inversora (B2) para os pontos de operação referidos e distúrbio do tipo <i>step</i> - com CEC (vermelho) e sem CEC (azul). . . . .	78
3.44 Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo <i>bumped</i> com ou sem o CEC. . . . .	80

3.45 Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo <i>step</i> com ou sem o CEC. . . . .	81
3.46 Tensões CA da barra inversora (B2) para o ponto de bifurcação e distúrbios do tipo <i>bumped</i> e <i>step</i> sem CEC. . . . .	82
3.47 Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS e tensões CA da barra inversora para diferentes ordens de referência do tipo <i>bumped</i> sem o CEC e sem VDCOL. . . . .	83
3.48 Diagrama unifilar do sistema exemplo. . . . .	85
3.49 Lugar das raízes para a variação do <i>setpoint</i> do elo CCAT. . . . .	87
3.50 Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a inversora e Binf. . . . .	88
3.51 Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a inversora e Binf com diferentes quantidades de CS. . . . .	89
3.52 Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a geração e a retificadora. . . . .	89
3.53 Lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>p</sub> do CCA do sistema exemplo. . . . .	91
3.54 Lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>i</sub> do CCA do sistema exemplo. . . . .	91
3.55 Alternativa de transmissão híbrida. . . . .	93
3.56 Diagrama unifilar do sistema híbrido do Rio Madeira. . . . .	94
3.57 Lugar das raízes para a variação dos pontos de operação do sistema híbrido do Rio Madeira. . . . .	96
3.58 Lugar das raízes dos pontos de operação do sistema híbrido equivalente (vermelho) e para inserção do bipolo homólogo (azul). . . . .	97
3.59 Lugar das raízes para a variação dos pontos de operação do sistema equivalente (vermelho) e para adição de um (azul) e dois (cinza) circuitos AC de 500 kV. . . . .	97
3.60 Lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>p</sub> do CCA do sistema híbrido. . . . .	98
3.61 Lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>i</sub> do CCA do sistema híbrido. . . . .	99
3.62 Lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>p</sub> do CCA do sistema híbrido - K <sub>i</sub> = 2500 pu. . . . .	100
3.63 Lugar das raízes para a variação do comprimento da linha CC do sistema híbrido. . . . .	101
3.64 Comparação do lugar das raízes para a variação do ganho K <sub>i</sub> do CCA do sistema híbrido. . . . .	101

# Listas de Tabelas

3.1	Parâmetros da linha de interconexão. . . . .	39
3.2	Condições iniciais para obtenção do ponto de operação base. . . . .	39
3.3	Autovalores do sistema base. . . . .	40
3.4	Modos eletromecânicos do sistema base. . . . .	41
3.5	Os 23 pontos de operação, para o mesmo patamar de carga/geração. .	43
3.6	PO 9 e 10 para o sistema com a LT interconexão 1. . . . .	46
3.7	PO 18 e 19 para o sistema com a LT interconexão 2. . . . .	46
3.8	Parâmetros do controle CCA do retificador. . . . .	51
3.9	Dados do modo crítico para variação dos ganhos do CCA do retificador.	52
3.10	Variação do carregamento nos 4 barramentos [MW]. . . . .	53
3.11	Seleção de linhas a partir da base de dados da ONS. . . . .	54
3.12	Novos pontos de operação para a aproximação entre os PO 9 e 10. .	70
3.13	Autovalores dos novos pontos de operação 7 e 8 para a aproximação ao eixo imaginário. . . . .	71
3.14	Autovalores para o ponto de operação 7 modificado. . . . .	72
3.15	Parâmetros predeterminados do sistema exemplo. . . . .	86
3.16	Níveis de curto-círcuito trifásico para o sistema exemplo. . . . .	86
3.17	Fatores de participação dos modos crítico e crítico 2 para o ganho $K_p = 0$ pu do CCA. . . . .	92
3.18	Autovalores para o ponto de operação base do sistema híbrido do Rio Madeira. . . . .	95
3.19	Parâmetros predeterminados do CCA do retificador para o sistema híbrido equivalente. . . . .	98
3.20	Fatores de participação dos modos crítico e crítico 2 para o ganho $K_p = 0$ pu do CCA. . . . .	99

# Listas de Abreviaturas

$A_{min}$	Controle por Área Mínima, p. 27
AH	Aproveitamento Hidrelétrico, p. 1
BH	Bifurcação Hopf, p. 7, 35
BSN	Bifurcação Sela-Nó, p. 7, 35
CA	Corrente Alternada, p. 1
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão, p. 1
CCA	<i>Current Control Amplifier</i> , p. 24
CCC	<i>Capacitor Commutated Converter</i> , p. 11
CC	Corrente Contínua, p. 1
CEA	<i>Constant Extinction Angle</i> , p. 21
CEC	<i>Current Error Control</i> , p. 27
CIA	<i>Constant Ignition Angle</i> , p. 21
CS	Compensador Síncrono, p. 39
ESP	Estabilizador de Sistemas de Potência, p. 4
FP	Fator de Participação, p. 42
GAMMA $_{min}$	Controle por Ângulo de Extinção Mínimo, p. 27
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i> , p. 11
IGBT	<i>Insulated-gate Bipolar Transistors</i> , p. 11
LCC	<i>Line Commutated Converter</i> , p. 11
LT	Linha de Transmissão, p. 39

MST	Margem de Segurança Tensão, p. 3
N	Região Norte, p. 1
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 2
PO	Ponto de Operação, p. 37
RAML	<i>Rectifier Alpha Min Limiter</i> , p. 28
RAT	Regulador Automático de Tensão, p. 4
RIAC	<i>Rectifier Integrator Alpha Clamp</i> , p. 28
RV	Regulador de Velocidade, p. 42
SCR	<i>Short Circuit Ratio</i> , p. 2, 29
SE/CO	Região Sudeste/Centro-Oeste, p. 1
SEP	Sistemas Elétricos de Potência, p. 4, 31
SIN	Sistema Interligado Nacional, p. 1
SPD	Semiplano Direito, p. 44
SPE	Semiplano Esquerdo, p. 51
STOL	<i>Short-Time Overload Limiter</i> , p. 23
VCO	<i>Voltage Controlled Oscilator</i> , p. 26
VDCOL	<i>Voltage Dependent Current Order Limiter</i> , p. 24
VSC	<i>Voltage Source Converter</i> , p. 11
VSF	Valor Especificador por Polo, p. 43

# Capítulo 1

## Introdução

O crescimento da demanda de energia elétrica deve ser acompanhado pela expansão dos sistemas de transmissão e geração. O Sistema Interligado Nacional (SIN) apresenta um elevado potencial hidráulico distribuído em várias bacias hidrográficas longe dos centros de consumo. Neste contexto, encontram-se em processo de construção na região Norte (N) do país o Aproveitamento Hidrelétrico (AH) de Belo Monte e na região Centro-Oeste (parte do subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO)) o AH do Rio Madeira. Além de Belo Monte, estão previstas na mesma região as usinas de Marabá, Serra Quebrada e São Luiz do Tapajós [1, 2].

Nos estudos dos AH do Rio Madeira, no caso específico do sistema de transmissão para a integração das usinas de Santo Antônio e Jirau à Rede Básica do SIN, foram analisadas várias alternativas de transmissão com diferentes tecnologias, entre elas: a opção puramente em corrente contínua (CC), com dois bipolos; a opção híbrida, com 50 % da potência transmitida em CC (1 bипolo de 3150 MW) e o restante em corrente alternada (2 linhas de 500 kV); e, por último, uma opção puramente em CA, com três circuitos em 765 kV. Resultados preliminares dos estudos apontavam a alternativa em CC como a mais adequada do ponto de vista técnico. Com o objetivo de promover maior concorrência, a decisão foi de promover um leilão com as três alternativas de transmissão, tendo como vencedor a opção puramente em corrente contínua. O sistema de transmissão associado ao complexo está composto por um elo de corrente contínua em alta tensão (CCAT), com dois bipolos de 3150 MW cada e tensão nominal de  $\pm 600$  kV, entre as subestações de Porto Velho e de Araraquara, distantes em 2375 km [1].

No caso dos estudos para o AH de Belo Monte, tinham-se como alternativas preliminares para a interligação Norte-Sudeste os seguintes sistemas de transmissão: CA com três linhas em 765 kV, CA com duas linhas em 1000 kV, CA em meia onda e 800 kV, CC com dois bipolos de  $\pm 660$  kV ou  $\pm 800$  kV. Para as alternativas CC foram analisados cinco pontos considerados adequados como terminais receptores na região sudeste: Estreito (ES), Fernão Dias (FD) e Nova Iguaçu (NI) em 500 kV;

Bauru (BA) e Oeste (OE) em 440 kV. Dos quais, seis combinações entre terminais resultaram com desempenho técnico satisfatório: OE-ES, ES-NI, BA-NI, ES-ES, FD-FD e BA-ES.

O índice preditivo de desempenho para elo CCAT, mais conhecido como relação de curto-circuito (SCR - *short circuit ratio*), conjuntamente com avaliações de desempenho dinâmico, descartaram as alternativas com terminais em FD-FD ou com um terminal em 440 kV, estas últimas por apresentarem maiores riscos de falhas de comutação simultâneas devido à maior proximidade com as subestações de Araraquara e Ibiúna (elo CCAT de Itaipu). Ao final, decidiu-se indicar a solução com os bipolos separados em ES-NI, considerando a flexibilidade para o atendimento a duas áreas diferentes do sistema, maior flexibilidade operativa (possibilitar melhor distribuição dos fluxos no subsistema SE), redução de falhas de comutação, entre outros. O sistema de transmissão associado ao complexo Belo Monte está composto por dois bipolos de  $\pm 800$  kV, 4000 MW de potência nominal cada e 6 condutores por polo, interligando a subestação Xingu em 500 kV ao sudeste em duas subestações: Estreito distante cerca de 2092 km e Terminal Rio distante cerca de 2439 km [2].

Nos cenários descritos anteriormente, para os dois complexos hidrelétricos, com a opção híbrida cogitada como alternativa para o sistema de transmissão do Rio Madeira e finalmente os dois bipolos do sistema Belo Monte, observa-se que estes têm a sua operação de forma paralela com o sistema CA. Considerando que este tipo de topologia possa se tornar uma tendência para as futuras expansões do sistema, devido ao aumento da quantidade de elos CCAT no SIN, a realização de estudos sobre o assunto se torna bastante relevante.

Dentre os estudos possíveis em sistemas com elos de CCAT, o Submódulo 2.5 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [3], estabelece que as avaliações do desempenho dinâmico de elos CCAT frente à perturbações são necessárias para minimizar a possibilidade de instabilidades, falhas de comutação e interações indesejáveis com o sistema CA, bem como para a otimização do sistema de controle. Já o Submódulo 23.3 [4], que trata das diretrizes e critérios para estudos elétricos, estabelece que devem ser realizadas simulações da influência e do comportamento de um elo CC em um sistema CA e vice-versa, verificando tempos de recuperação pós-defeito, capacidades de sobrecarga, limites de corrente, necessidade de controle para amortecimento de oscilações, a redução automática da potência em situações de contingência (simples ou múltipla), entre outros.

No âmbito das avaliações dinâmicas, KUNDUR *et al.* [5] definem e classificam a estabilidade de sistemas elétricos em três classes: angular, frequência e tensão; em função da natureza física do problema. No entanto, uma subclassificação é dada pelo tamanho do distúrbio, como grande ou pequena perturbação. A classificada como pequena ocorre continuamente sob a forma de variações de carga, onde o sistema

deve ser capaz de se ajustar para operar satisfatoriamente. Já o segundo tipo envolve grandes mudanças estruturais, destacando a sua característica não-linear, causado, por exemplo, por um curto-circuito.

A capacidade de recuperar uma condição de equilíbrio após a perturbação é o que definirá se o sistema ficará estável ou não. Por conseguinte, são necessários diversos pontos de operação com condições operativas distintas, de maneira a determinar possíveis problemas no sistema. Em [3], além disso, é determinado que níveis de curto-circuito máximo e mínimo nas estações retificadora e inversora devem ser calculados considerando situações de contingência simples nas duas redes CA conectado às estações, níveis de carregamento do sistema e intercâmbios nas principais ligações do país.

Neste trabalho serão abordados estudos de estabilidade de tensão e de estabilidade angular, sob a ótica de pequenas perturbações, e, quando necessário, através de simulações de transitórios eletromecânicos, para casos com sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão em paralelo com sistemas de transmissão de corrente alternada.

Os procedimentos de rede [4], também definem critérios para estudos de segurança de tensão a serem usados no planejamento da expansão e operação do sistema. Dentre as especificações, define-se a margem de segurança de tensão (MST) como sendo a distância mínima para um ponto de operação do sistema onde há risco de instabilidade de tensão, e que o sistema elétrico é considerado seguro em relação à tensão quando, para uma dada condição operativa, a MST e os níveis de tensão encontram-se em conformidade com os critérios estabelecidos. De forma geral, devem ser empregados técnicas de análises estáticas para a definição da MST e simulações no domínio do tempo devem confirmar as margens apontadas por estas análises.

Neste contexto, apresenta-se neste trabalho uma análise dinâmica do fenômeno da instabilidade de tensão em sistemas CC e CA, pelo método dos autovalores. Introduz-se conceitos qualitativos da teoria de bifurcações em sistemas elétricos, focando na bifurcação de Hopf e empregando o que é chamado de metodologia direta para a detecção de bifurcações.

## 1.1 Objetivo

O presente trabalho de dissertação tem por objetivo investigar possíveis problemas relacionados a sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão em paralelo com sistemas de transmissão de corrente alternada, do ponto de vista da teoria de pequenas perturbações.

Através das simulações de estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações,

serão analisados os modos de oscilação provenientes do elo CC e os impactos que estes causam ao sistema, empregando para isso o cálculo dos autovalores, *mode shapes*, fatores de participação e lugar das raízes.

Para tanto, serão empregados sistemas equivalentes e representativos da topologia referida, na determinação de modos de oscilação, uma vez que estes podem auxiliar na compreensão e definição da natureza de instabilidades que podem aparecer nos sistemas.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A literatura apresenta estudos, empregando elos de CC, para o amortecimento de oscilações em sistemas com transmissão CA e CC em paralelo. Outros retratam o desempenho dinâmico deste tipo de topologia com enfoque na estabilidade angular e na estabilidade de tensão. Em particular, PADIYAR e RAO [6] presentam um estudo do problema da instabilidade de tensão utilizando a análise modal para identificar modos de oscilação associados ao problema e provenientes do elo CCAT. A seguir, serão descritos trabalhos utilizando elos CCAT, relacionados a pequenas perturbações, desempenho dinâmico e instabilidade de tensão, respectivamente. No entanto, cabe ressaltar que o principal interesse está em contextualizar a instabilidade de tensão sob a ótica de pequenas perturbações.

Um dos primeiros dispositivos utilizados, com a finalidade de atenuar oscilações eletromecânicas, foi o Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP), também conhecido como *Power System Stabilizer*, que apresenta uma solução efetiva para o amortecimento de oscilações eletromecânicas com a introdução de sinais estabilizantes suplementares aos reguladores automáticos de tensão (RAT) dos geradores. Este tipo de solução, amplamente utilizada em sistemas elétricos de potência (SEP), foi empregado na operação inicial do sistema *Pacific AC Intertie*, onde estudos prévios da energização mostraram que oscilações não amortecidas eram susceptíveis de ocorrer. Como resultado desses estudos, resolveu-se instalar estabilizadores de sistemas de potência na maioria dos geradores deste sistema. Porém, alguns anos depois, oscilações espontâneas da mesma característica aconteceram ao longo de todo sistema ocidental, ou *Western Interconnected Power System*. Tal fato acarretou no desenvolvimento de um algoritmo de controle para modulação de pequenas perturbações no sistema de corrente contínua do terminal retificador do *Pacific HVDC Intertie*, empregando como sinal de modulação a taxa de variação de potência do sistema CA em paralelo, proporcionando amortecimento adicional as oscilações do sistema AC em paralelo [7].

Uma aplicação de elos CCAT na estabilização de oscilações de frequência em um sistema de duas áreas com interconexão CA e CC em paralelo foi apresentado por

NGAMROO [8]. O controlador do elo CC é inserido na modelagem dos controladores automáticos de geração (CAG) das áreas interconectadas no sistema, empregando os desvios de frequência de cada área para amortecer as oscilações de frequência de intercâmbio.

Neste mesmo contexto, a dissertação de mestrado de NOHARA [9] apresenta a influência da modulação de potência de elos CCAT na estabilidade de frequência do sistema assíncrono do complexo Rio Madeira. Assim como, a influência do controle de frequência do sistema CC no amortecimento de modos de oscilação interárea em sistemas CC e CA em paralelo, condição operativa alcançada quando o complexo opera de forma síncrona com o SIN.

Em interconexões assíncronas mediante elos CCAT, normalmente não existem forças restauradoras responsáveis por manter as unidades geradoras da ilha com a mesma velocidade (sincronismo) em relação ao restante deste sistema, sendo necessário realizar a estabilização da frequência através da modulação de potência elétrica transmitida pelo elo e/ou pela regulação primária das unidades geradoras. Este é o caso do complexo Rio Madeira, onde não há contribuições da característica amortecedora da carga com relação à frequência, as cargas presentes são compostas predominantemente pelos serviços auxiliares das usinas e subestações, ínfimas em comparação com a capacidade instalada do parque gerador. A modulação de potência é necessária posto que os conversores possuem uma característica de potência constante com relação à frequência elétrica [9].

A estabilidade e o controle no desempenho dinâmico de elos CCAT em paralelo com sistemas de transmissão em corrente alternada foi estudada por HAMMAD [10]. Mostrando a possibilidade de ocorrências de problemas de instabilidade angular e de tensão, e que esta tendência é mais intensificada à medida que a interconexão paralela CA é mais forte. No caso de interconexões CA com muito menor capacidade de transmissão do que sistemas CC, o elo CCAT pode efetivamente aumentar a margem de estabilidade mantendo o modo de operação com potência constante ou aumentando temporariamente a ordem de corrente. Em casos onde os sistemas são de capacidade comparável, empregar o modo de controle de potência constante clássico, mesmo com controles suplementares (modulação de potência), desprove o sistema de um torque sincronizante necessário durante a perturbação, aumentando os riscos dos dois tipos de instabilidade. Mesmo o aumento da corrente CC, dentro dos limites da capacidade de sobrecarga do sistema CC, produz o efeito contrário que no caso anterior com uma diminuição da capacidade de transmissão do sistema CA. Ao invés de utilizar as capacidade de sobrecarga, um suporte adicional de potência reativa com atuação rápida nos terminais do elo é mais conveniente. O autor ainda menciona que com a utilização de outras técnicas de controle apresentado por TO *et al.* [11], o desempenho dinâmico de um sistema CC e CA paralelo pode

ser melhorado e o risco de instabilidades dos tipos mencionados reduzidos.

O fenômeno de colapso de tensão ou instabilidade de tensão têm sido observado em sistemas CA quando operado perto da máxima transferência de potência ou em locais com cargas de características especiais, este último é o caso dos terminais conversores dos elos de CCAT. Problemas de estabilidade de tensão podem ocorrer nos dois terminais, o retificador e o inversor, indiferentemente se o sistema é usado para aplicações de longa distância ou na configuração *back-to-back*. Entretanto, o fenômeno é geralmente associado a sistemas CC conectados a sistemas de CA fracos e as características desfavoráveis de potência reativa dos conversores [5].

Alguns artigos apresentam métodos para analisar o problema, utilizando conceitos de índices de sensibilidade [12, 13] ou do limite de máxima potência (MAP - *Maximum Available Power*) [14], conformando o que é denominado análise estática da instabilidade de tensão.

Existe um especial interesse no fenômeno quando um sistema CA fraco está conectado ao terminal inversor. Os mecanismos que induzem a este tipo de instabilidade em sistema com elos CCAT são vários. PILOTTO *et al.* [15] apresentam alguns casos. Se o carregamento resultante força o sistema CC além da sua capacidade, um processo de instabilidade de tensão se inicia tendo como resultado um colapso de tensão. A instabilidade de tensão também pode ser associada aos transformadores conversores de *tap* variável sob carga, considerado um fenômeno mais lento. Neste mesmo artigo, um tipo de instabilidade é apresentada como um fenômeno da interação entre controladores em um sistema CA/CC, que, sob certas condições, tornam-se instáveis causando oscilações de tensão na barra de interface, denominada oscilações de tensão induzidas por controle (*control induced voltage oscillations*). Neste caso em particular, as oscilações de tensão são causadas por um mal ajuste dos controladores, estabelecendo-se um ciclo limite pela ação do controlador de corrente e do VDCOL. Os autores sobressaltam que fenômeno referido não deve ser considerado um problema de instabilidade de tensão, uma vez que uma simples modificação nos parâmetros dos controles pode corrigir o problema. E também que, um mau ajuste dos controladores pode produzir uma larga variedade de modos de oscilações. Concluindo que, em um sistema CA/CC complexo o fenômeno de colapso de tensão e o de oscilações de tensão induzidas por controle podem existir de forma combinada e podem levar a persistentes falhas de comutação.

A natureza dos sistemas elétricos é fortemente não-linear e, por conseguinte, técnicas de análise não-lineares são necessárias para ajudar a entender problemas de instabilidade. Uma das técnicas a respeito disso é, o da teoria das bifurcações, que tem sido usada extensivamente para analisar a estabilidade de tensão em SEP. Quando a estrutura dinâmica do sistema muda qualitativamente sob a variação de um parâmetro, o sistema é dito que sofre uma bifurcação. Normalmente, o parâme-

tro utilizado para esta análise corresponde à variação lenta da carga [16].

Entre as bifurcações, o conceito mais difundido é o da bifurcação Sela-Nó (BSN), caracterizada pelo desaparecimento súbito do ponto de equilíbrio estável do sistema. Usualmente, ocorre quando o SEP, com modelos de carga do tipo potência constante, se encontra fortemente carregado, atingindo a máxima transferência de potência e tendo como consequência um colapso de tensão. A matriz jacobiana do fluxo de potência torna-se singular e, consequentemente, sem solução no ponto onde ocorre BSN. Do ponto de vista da matriz de estados, uma BSN é associado a um autovalor cruzando a origem ao longo do eixo real [16]. A bifurcação de Hopf (BH) não está associada ao desaparecimento do ponto de equilíbrio e sim à presença de um ponto de equilíbrio que pode ser estável ou instável, desenvolvendo ciclos limites e levando o sistema a problemas oscilatórios sustentáveis (supercrítico) ou não (subcrítico). Este tipo de bifurcação é associado a um autovalor complexo cruzando o eixo imaginário sob a variação de um parâmetro [16].

PADIYAR e RAO [6] avaliam a instabilidade de tensão, considerando a dinâmica do sistema CC e utilizando a análise dos autovalores, cujos resultados são validados com simulações não-lineares no tempo e comparados com os obtidos a partir da análise estática. O sistema em estudo corresponde a um sistema monopolar de dois terminais, com valores nominais de SCR para a retificadora de 3.5 e para inversora de 3.0. A influência do controle utilizado, tanto no retificador (corrente ou potência constante) como no inversor (ângulo mínimo de extinção constante ou tensão CC constante), nas análises também é investigada. O artigo apresenta o comportamento de dois autovalores relacionados ao elo CCAT (nenhuma máquina é representada dinamicamente), definidos como modos críticos. Somente um é associado à malha de controle do elo, relacionado ao controlador de potência e com a característica de ser autovalor real negativo para certas condições de análise. O segundo modo crítico possui a característica de ser um autovalor complexo, com a peculiaridade de apresentar traçados distintos no plano complexo (*s-plane*) com a chance de se tornar um autovalor real para certas condições. As condições de análise correspondem a combinações entre as estratégias de controle possíveis (no retificador e inversor), variações dos ganhos do controlador de corrente e das relações de curto-circuito nas barras de interface. O primeiro modo crítico somente aparece quando o modo de operação potência constante é utilizado, podendo ser a causa de uma bifurcação do tipo Sela-Nó. Enquanto que, o segundo modo crítico aparece em todas as situações analisadas e pode ser a causa de bifurcações do tipo Hopf.

O artigo demonstra que a análise dinâmica utilizada é exata e apresenta mais informações que a análise estática, além de concluir que, análises estáticas são precisas quando a instabilidade é resultante de uma bifurcação Sela-Nó, o que conduz a um colapso de tensão. Por outro lado, análises estáticas apresentam resultados otimis-

tas e enganosos quando a instabilidade é resultante de uma bifurcação de Hopf. O autor ainda sobressalta que nos casos onde o inversor está como o terminal de ajuste de tensão, as instabilidades de tensão são resultantes de bifurcações de Hopf, com oscilações de tensão crescentes e frequências menores que 15 Hz.

AIK e ANDERSSON [16] apresentam uma metodologia para a avaliação analítica não-linear em sistemas com elos CCAT e as condições para a ocorrência do fenômeno. Considera um sistema ponto-a-ponto com modelos básicos e com modelos mais elaborados, assim como, um sistema *multi-infeed*, ou seja, com dois elos CC conectados ao mesmo sistema. Ainda, estabelece que o tipo de estabilidade das bifurcações de Hopf não pode ser determinado pela análise dos autovalores, uma vez que os fenômenos são essencialmente não-lineares e que existem softwares especializados para este quesito, embora possam ser demonstrados usando programas de transitórios eletromecânicos. Isto é realizado dando um degrau na ordem de referência do elo e, depois de um tempo, voltando ao valor inicial. Entre as várias conclusões, cita-se as seguintes: bifurcações Sela-Nó ocorrem somente para o elo CC em controle de potência, concordando com o artigo anterior; BSN ocorrem na condição de singularidade da matriz jacobiana do fluxo de potência; BH são do tipo subcrítico para todas as alternativas, menos para o caso onde a linha CC é representada com uma capacidade representativa de uma linha longa.

A referência [17] apresenta um abordagem para investigar a resposta dinâmica de alta frequência de elos CCAT e de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). Empregando a representação detalhada do modelo da ponte conversora baseado no uso de funções de chaveamento generalizada, compara o resultado dos autovalores para as modelagens eletromecânica (convencional) e eletromagnética (alta frequência). O que cabe ressaltar é que apresenta o modo crítico complexo como um autovalor associado ao controlador de corrente da estação retificadora, por conseguinte, denomina-o como modo de controle de corrente.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta conceitos básicos associados aos elos CCAT, referentes aos componentes do sistema, aos arranjos de configurações possíveis e aos modos de operação. Além disso, o capítulo destaca as modelagens não-linear e linear do controle do elo utilizados nos programas de estabilidade transitória e estabilidade a pequenas perturbações, respectivamente.

O capítulo 3 apresenta os resultados e discussões das análises realizadas nos três sistemas empregados, o sistema base, exemplo e híbrido. Com técnicas de análise modal e simulações lineares e não-lineares no domínio do tempo.

O capítulo 4 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O apêndice A apresenta conceitos elementares referentes à teoria da análise modal, descrevendo sucintamente os conceitos matemáticos utilizados neste tipo de análise.

# Capítulo 2

## Transmissão em Corrente Contínua

O embasamento teórico empregado para apresentar os conceitos básicos dos elos CCAT neste capítulo foi amplamente discutido na literatura [18–21]. Trabalhos acadêmicos, entre os quais podemos citar alguns mais antigos [22–24] e outros mais recentes [25], já apresentaram os fundamentos teóricos para a modelagem de elos CCAT não-lineares utilizados em programas de estabilidade eletromecânica. Outros, como [26, 27], apresentaram as aproximações necessárias para a modelagem linear de elos CCAT e sua utilização em programas de estabilidade a pequenas perturbações.

As características básicas, os modos de operação, os níveis das malhas de controle, a característica estática do controle, assim como, os modelos do controle linear e não-linear do elo CCAT expostos neste capítulo consideram-se necessários para a interpretação dos resultados neste trabalho. O equacionamento básico, as convenções adotadas nos modelos linear do retificador e do inversor, bem como a modelagem da linha CC, podem ser consultados no manual do PACDYN [28].

### 2.1 Introdução

A motivação original para o desenvolvimento da tecnologia em corrente contínua era a eficiência na transmissão de energia, visto que a perda de potência numa linha de transmissão CC é menor que a sua correspondente em corrente alternada (CA) para a mesma potência [18].

A invenção da válvula de mercúrio de alta tensão um pouco mais de meio século atrás abriu o caminho para o desenvolvimento da transmissão em CCAT. Os primeiros elos CCAT foram introduzidos na União Soviética em 1950 e comercialmente na Suécia em 1954, que rapidamente foram seguidos por projetos de maiores magnitudes. O sucesso da nova tecnologia desencadeou imediatamente a investigação e o desenvolvimento de uma alternativa de válvulas de estado sólido, que em meados da década de 1960 já havia deslocado o uso de válvulas de arco de mercúrio [20].

A consolidação e o progresso substancial desta tecnologia aumentou a sua competitividade. Linhas CC possuem menores perdas na transmissão e custos do que seu equivalente CA, porém requerem equipamentos terminais (subestações conversoras) que aumentam os custos e as perdas de energia. Assim, tradicionalmente, a opção CC era considerada economicamente viável apenas quando a distância envolvida era longa, a quantidade de energia a ser transferida grande ou quando as frequências dos dois sistemas não eram compatíveis (50 e 60 Hz) [18].

Atualmente um fator importante na determinação entre uma interconexões CA ou CC é avaliar se a sincronização dos sistemas previamente separados é viável, por exemplo, se a interconexão CA é capaz de manter o sincronismo entre os sistemas sob condições de operações extremas.

Tais fatores como o mencionado dificultam a operação dos sistemas, porém podem ser superados amplamente empregando uma interconexão CC. Algumas das vantagens das interconexões CC são: a falta de limitações técnicas quanto ao comprimento de cabos submarinos, a não necessidade de se operar em sincronismo, a não contribuição para o aumento da capacidade de curto-circuito, a independência da potência transferida com os parâmetros do sistema (impedância, ângulo de fase, frequência e tensão), a aptidão da interconexão CC para ser usada como uma reserva de geração com capacidade de fornecimento imediato e, uma das mais importantes, o capacidade do elo CCAT em ser operado buscando uma melhoria da estabilidade de um dos ou dos dois sistemas CA interconectados (através da modulação de potência) [20].

A maioria dos projetos de Elos CCAT (HVDC - *High-Voltage Direct Current*) em operação comercial hoje empregam o tipo de configuração da conversora com comutação natural ou comutado pela linha (LCC - *Line Commutated Converter*), utilizando o tiristor como principal elemento na conversão. Este tipo de elo CCAT é o empregado como base para esta dissertação.

Cabe ressaltar que existem outras novas tecnologias de transmissão em CCAT, uma delas é uma modificação da tecnologia LCC-HVDC com a inserção de capacitores em série entre o transformador conversor e a ponte conversora, denominados como conversores com comutação capacitativa (CCC - *Capacitor Commutated Converter*). Outra tecnologia é a conhecida como conversores fonte de tensão (VSC - *Voltage Source Converter*), recebendo esse nome pelo fato de se comportar como uma fonte de tensão. Este tipo de conversor utiliza chaves autocomutadas IGBT (*insulated-gate bipolar transistors*) com capacidade de condução e corte, permitindo maior flexibilidade operativa para o sistema. Contudo, tanto a comparação do custo de implantação como a máxima capacidade desta tecnologia atualmente fazem ainda da tecnologia convencional mais favorável.

## 2.2 Características Básicas

Os elos CCAT podem ser configurados de diversas maneiras para atender as necessidades operacionais.

A configuração **monopolar** emprega um condutor de alta tensão, usualmente com polaridade negativa, e o retorno é realizado pela terra (ou oceano) ou com um condutor metálico de baixa tensão. No esquemas recentes, o uso do retorno pela terra está se tornando menos comum por causa da oposição ambiental. Outra configuração é a **homopolar** empregando dois condutores com a mesma polaridade operando com retorno pela terra ou um condutor metálico, usualmente a polaridade preferida é a negativa.

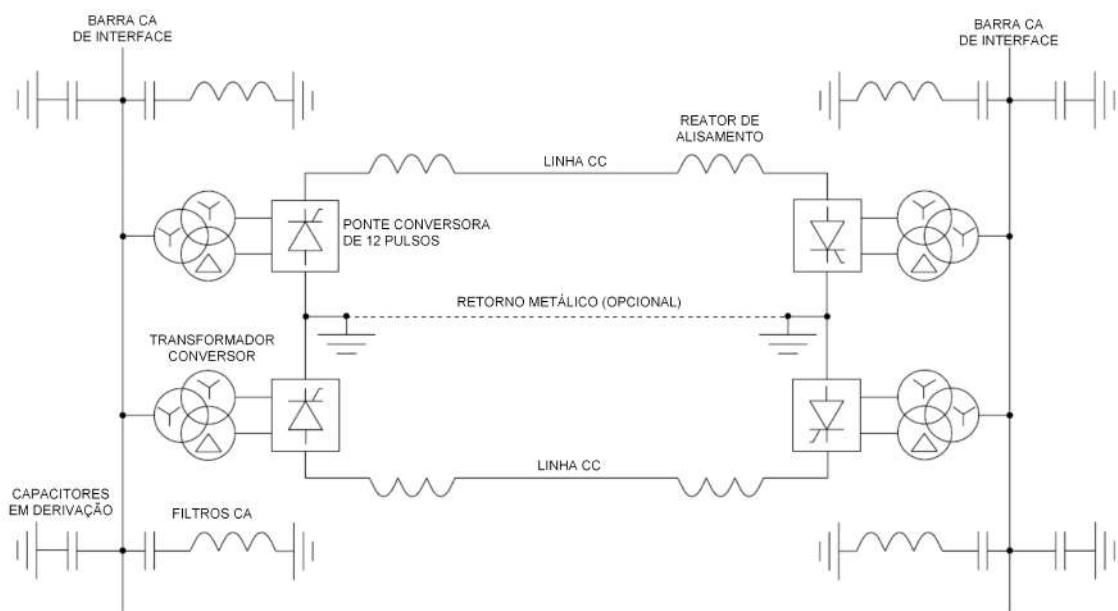


Figura 2.1: Diagrama unifilar de um elo CCAT bipolar. Fonte [21].

A configuração mais empregada é a **bipolar** com dois condutores, um com polaridade negativa e o outro positiva. Cada terminal está composto por duas pontes conversoras conectadas em série no lado CC, tendo a junção entre as duas aterrada. Em condições de regime permanente as correntes nos dois polos são iguais e não há corrente de terra. Em caso de falha de um dos polos, o outro pode seguir operando com metade da carga ou mais, usando sua capacidade de sobrecarregamento. A Figura 2.1 apresenta um diagrama unifilar simplificado de um sistema de transmissão em corrente contínua CCAT bipolar. Caso seja utilizado o retorno metálico, o aterramento é realizado somente em um terminal.

Uma outra configuração é o **back-to-back**, onde tanto o retificador como o inversor estão alocados na mesma subestação. Usualmente empregado para interconexões de redes assíncronas, sistemas próximos com diferentes frequências, ou

para suprir uma maior potência ativa onde o sistema CA se encontra no limite da capacidade de curto-circuito ou para o controle do fluxo de potência.

Um LCC-HVDC consiste tipicamente dos seguintes componentes. O **conversor**, que realiza a conversão de energia entre CA e CC. Geralmente tem um arranjo de 12 pulsos, no qual duas pontes de 6 pulsos estão conectadas em série no lado CC e em paralelo no lado CA. A comutação das válvulas é ordenada pelo controle do conversor. O retificador é o conversor em que a energia flui do CA para o CC, e o inversor é o conversor em que a energia flui do CC para o CA.

Os **transformadores conversores** ajustam a tensão CA fornecida às pontes conversoras para adequar a tensão CC nominal. O transformador para uma ponte de 12 pulsos tem uma configuração estrela-estrela-delta de três enrolamentos, ou uma combinação de transformadores em conexão estrela-estrela e estrela-delta. Os transformadores conversores normalmente são unidades monofásicas.

A operação do conversor gera harmônicos de corrente e tensão nos lados CA e CC, respectivamente. No lado CA, um conversor com um número de pulsos  $p$  gera harmônicos característicos com ordem de  $np \pm 1$  ( $n = 1, 2, 3\dots$ ). Os **filtros CA** são instalados para absorver esses componentes harmônicos e para reduzir a distorção abaixo de um limite necessário. No lado CC, a ordem dos harmônicos é  $np$ . Os **filtros CC**, junto com os reatores CC, reduzem os harmônicos que fluem pela linha CC. Não são necessários filtros de corrente contínua nos sistema de transmissão por cabo ou *back-to-back*.

Um LCC-HVDC em regime permanente consome energia reativa com um valor de aproximadamente 50 % da energia ativa, ou CC transferida. Os bancos de capacitores instalados no conversor CA fornecem a potência reativa necessária para manter a tensão do barramento CA do conversor. Para obter um fator de potência satisfatório para o conversor, os **capacitores shunt** são normalmente subdivididos e comutados por disjuntores em função da variação de potência CC. Alguns capacitores em derivação são configurados como filtros CA de harmônicos.

O **reator CC** ou reator de alisamento (*smoothing reactor*) contribui para o alisamento da corrente CC na linha, assim como para a limitação da corrente de curto-círcuito. Cabe ressaltar que a indutância do transformador conversor também contribui significativamente para estas funções.

**Cabos ou linhas aéreas** estão sempre presentes nas conexões de um polo ao outro, exceto em sistemas *back-to-back*. Nas conexões dos eletrodos, muitos sistemas existentes utilizam o retorno por terra em condições normais de funcionamento (sistemas monopolar) ou em condições de emergência (sistemas bipolares).

## 2.3 A Operação do Elo CCAT

A corrente no elo CC operando em regime permanente é dada pela Lei de Ohm como uma diferença entre as tensões CC nos terminais da linha (retificador e inversor) dividido pela sua resistência, conforme Equação 2.1 e 2.2. Logo,

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R} \quad (2.1)$$

onde,  $V_{dr} = V_{dor} \cos(\alpha)$  e  $V_{di} = V_{doi} \cos(\gamma)$ , ou seja,

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos(\alpha) - V_{doi} \cos(\gamma)}{R_{cr} + R - R_{ci}} \quad (2.2)$$

$V_{do} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} Em$  é chamado de tensão direta ideal sem carga (*ideal no-load direct voltage*),  $Em$  é a tensão de pico fase-neutro,  $\alpha$  é o ângulo de disparo ou atraso,  $\gamma$  é o ângulo de extinção,  $R_c = 3Xc/\pi$  é a resistência de comutação equivalente do retificador e inversor,  $Xc$  é a reatância de comutação,  $R$  é a resistência da linha. A Equação 2.2 pode ser reescrita levando em conta o número das pontes conversoras conectadas em série (B) e o *tap* do transformador conversor (T), dado por:

$$I_d = \frac{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} BTEm_r \cos(\alpha) - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} BTEm_i \cos(\gamma)}{R_{cr} + R - R_{ci}} \quad (2.3)$$

Desde que a resistência é fixa, a corrente é proporcional à diferença das tensões e é controlada através delas. Estas tensões CC dependem das tensões dos sistema CA na barra de interface (barra retificadora ou inversora), da reatância dos transformadores conversores (reatância de comutação), da posição dos *tap* dos transformadores conversores e dos ângulos de disparo ( $\alpha$ ) e extinção ( $\gamma$ ) das válvulas conversoras. A Equação 2.3 provê o circuito equivalente para um elo CCAT, conforme Figura 2.2.

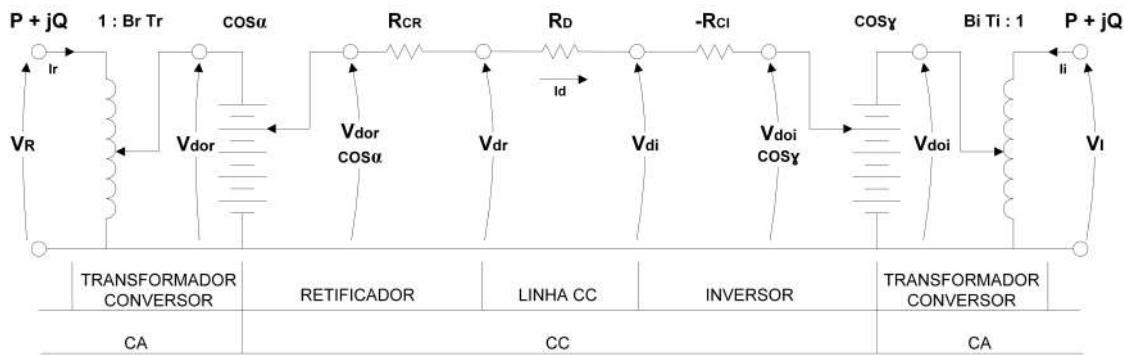


Figura 2.2: Circuito equivalente de um elo de corrente contínua em regime permanente. Fonte: [18].

As duas tensões CC nos terminais da linha podem ser controladas por qualquer um destes dois métodos: controle do sistema CC ou controle da tensão alternada.

No caso do controle do sistema é empregado os ângulos de disparo ( $\alpha$ ) e extinção ( $\gamma$ ) das válvulas conversoras, e no caso do controle da tensão alternada são empregados os *taps* dos transformadores conversores. As duas restantes não são empregadas visto que as tensões CA da rede variam em decorrência de qualquer perturbação e as reatâncias de comutação permanecem fixas.

Enquanto o controle do sistema CC é rápido, com tempos de 1 a 10 ms, o controle da tensão alternada através das variações dos *taps* dos transformadores é lento, com 5 a 6 segundos por passo. Assim, o controle do sistema CC é inicialmente usado para ações rápidas seguido por mudanças dos *taps* dos transformadores conversores para restabelecer os parâmetros nos valores predeterminados (ângulo de disparo do retificador e a tensão no inversor). Esta capacidade de controle rápido do sistema CC contribui na estabilidade do sistema CA.

Em operação normal, a filosofia de controle empregada outorga o controle da corrente CC ao conversor operando como retificador e o controle da tensão CC ao conversor operando como inversor. Os mesmos são parametrizados com ângulos de disparo ( $\alpha$ ) e de extinção ( $\gamma$ ) em valores menores possíveis de maneira a se obter um maior perfil de tensão CC e um menor consumo de potência reativa nas barras de interface.

O resultado do aumento do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de um conversor, ou seja, o atraso na ignição na válvula a ser comutada, é percebida como uma redução do valor médio da tensão CC dado pelo fator  $\cos(\alpha)$ . A tensão CC então é variada de um valor máximo para  $\alpha$  igual a zero, levado a zero quando  $\alpha$  for igual a  $90^\circ$  e a valores negativos para ângulos maiores de  $90^\circ$ , condição necessária para a operação do conversor como inversor.

A complexidade das malhas de controle de um elo CCAT torna necessária a organização de maneira hierárquica. O terminal em uma extremidade do sistema de transmissão CC é dividido em diferentes níveis. No nível mais alto encontra-se o **Controle Mestre** (*Master Control*), seguido pelo **controle do bipolo**, compreendendo os polos negativo e positivo, que por sua vez possuem seus próprios controles denominados **controle de polo**, e cada um destes seus **controles das pontes conversoras**. Ressalva-se que diferentes estruturas hierárquicas podem ser empregadas no controle do elo, variando de acordo com os requisitos do projeto.

O controle do bipolo recebe a ordem de potência ( $Pset$ ) do operador, que é submetido a um controle de aumento ou diminuição, a fim de proteger o sistema contra mudanças bruscas de potência. Um controle suplementar pode ser definido neste nível através de um sinal auxiliar. O  $Pset$  é dividido pela tensão CC do conversor ( $Vc$ ) derivando na ordem de corrente ( $Iord$ ) que é enviada para os controles dos polos. O controle do bipolo possui as funções características dele próprio seguido pelo controle de sobrecarga (STOL), congelamento da medição de tensão CC e a

modulação de potência. O controle de polo possui a função determinar um sinal de tensão proporcional ao erro de corrente ( $Ie$ ), através da comparação da corrente CC no conversor ( $Ic$ ) e a ordem de corrente ( $Iord$ ) após o VDCOL. No caso dos conversores operando como inversores um outro sinal é introduzido após a comparação, a margem de corrente ( $Imarg$ ). Este controle pode ser dividido em dois blocos, são eles: o CCA e o VDCOL. O controle da ponte conversora recebe o sinal proporcional ( $Uc$ ), recebido pelo VCO, que produz os pulsos de disparo para as válvulas conversoras. Esta estrutura hierárquica básica descrita será detalhada na seção 2.6.

## 2.4 A Característica Estática do Controle

A característica estática do controle sofreu alterações a medida que se acumulava mais experiência na operação dos elos de CCAT, por exemplo, com a implementação do VDCOL. Apesar destas implementações não serem padronizadas, havendo diferenças entre fabricantes, uma característica estática  $Vd$ - $Id$  típica de um elo CCAT é apresentada na Figura 2.3. Neste gráfico cada segmento é o resultado de ação de um determinado elemento de controle, cuja ação está limitada a uma faixa de operação predefinida. O ponto de operação do elo é definido pelo cruzamento das características estáticas referentes ao retificador, segmento formado pelos pontos ABPCDE, e ao inversor, formado por FGHIPK.

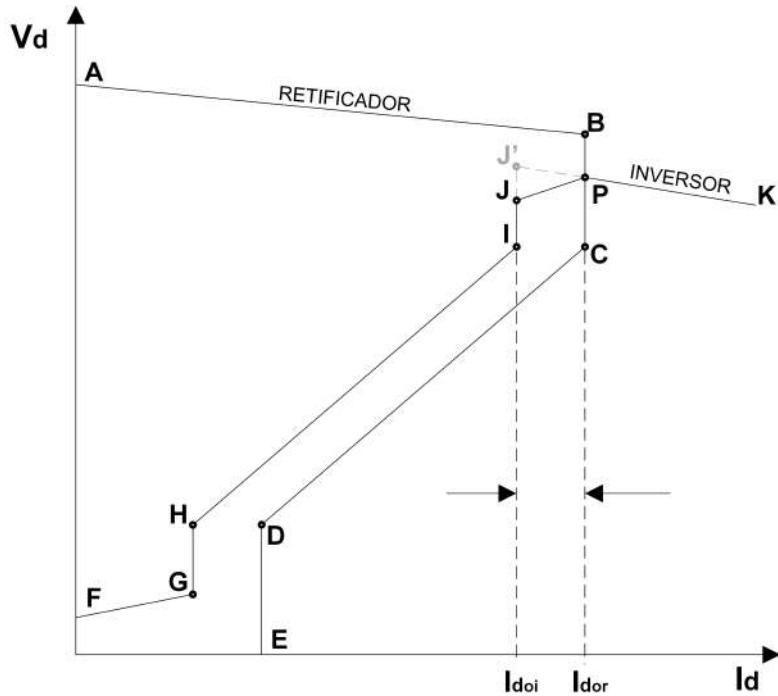


Figura 2.3: Característica estática  $Vd$ - $Id$  completa do controle. Fonte: [21].

Cruzamento do segmento BPC do retificador com o PK do inversor. Caracteriza-se pelo controle de corrente realizado pelo retificador, enquanto o inversor mantém seu ângulo de extinção no valor mínimo. A corrente na linha CC é definida pelo Controle do Bipolo, sem nenhuma alteração do Controle de Polo ou do Controle da Ponte Conversora. Condição conhecida como modo de operação normal, descrita na seção 2.6.

Cruzamento do segmento AB do retificador com o IJ do inversor. Caracteriza-se por ter o ângulo de disparo do retificador no seu valor mínimo, passando o inversor a controlar a corrente. A corrente na linha CC é  $I_{doi}$ , menor que para a condição anterior, e o controle é realizado através do ângulo de extinção do inversor. Condição conhecida como modo de operação reduzido, descrita na seção 2.6.

Cruzamento do segmento AB do retificador com JP do inversor. Caracteriza-se como um estágio intermediário entre as duas condições anteriores, resultante da ação do CEC, descrita mais detalhadamente na seção 2.6.3.

Cruzamento do segmento AB do retificador com HI do inversor. Caracteriza-se pelo retificado com o seu ângulo de disparo no mínimo e o inversor assumindo o controle de corrente. O valor da ordem de corrente obedece a HI, sob ação do VDCOL do inversor.

Cruzamento do segmento CD do retificador com PK do inversor. Caracteriza-se pelo controle da corrente no retificador segundo a reta CD, sob ação do VDCOL do retificador.

Límite da corrente CC no valor mínimo segundo segmento DE para o retificador. E limite mínimo do ângulo de disparo correspondente ao segmento FG.

## 2.5 Modelos de Controle do Elo CCAT

Programas de estabilidade transitória, tal como o ANATEM, são usados para modelar os transitórios eletromecânicos de sistemas elétricos de potência, ou seja, são capazes de representar as dinâmicas dos rotores das máquinas, assim como as dinâmicas mais lentas das tensões CA e CC e o comportamento dinâmico da frequência do sistema. Neste tipo de programa é empregado a representação fasorial monofásica, onde o sistema CA é modelado a frequência fundamental, o que leva aos desequilíbrios, harmônicos e transitórios da rede serem desconsiderados. O modelo do elo CCAT deve incluir os elementos RLC do circuito da linha CC, assim como representar as malhas de controle chaves deste sistema, no entanto, outras de ações mais rápidas são desconsideradas ou simplificadas. Já os conversores CA/CC são representados por equações algébricas relacionando os valores médios das quantidades CC com os valores RMS das quantidades CA. O nível de tensão CA da barra de interface ou o valor crítico do ângulo de extinção da inversora para a ocorrência

da falha de comutação deve ser especificado, pelo fato que o fenômeno não pode ser modelado com precisão.

O objetivo básico de qualquer sistema de controle CC é estabelecer e manter a corrente da linha dentro de uma faixa específica. Outros parâmetros do sistemas CC e CA podem ser controladores direta e indiretamente para aprimorar o desempenho do sistema CC e a interação com sistema CA.

O modelo do sistema de controle varia de acordo com o fabricante, devido as filosofias adotadas por cada um. Estas diferenças tecnológicas representam um desafio adicional aos projetos, sendo este o caso do elo CCAT do Rio Madeira, onde os bipolos foram fornecidos por fabricantes diferentes. Sendo assim, a seguir apresenta-se de maneira sucinta a modelagem do sistema de controle da ALSTOM GRID, fornecedor do segundo bipolar pertencente ao sistema de transmissão CC do Rio Madeira (o primeiro foi fornecido pela ABB), enfatizando as diferenças com o modelo *built-in* do ANATEM.

Em condições normais, o controle do retificador atua sobre o ângulo de disparo mantendo a corrente igual à ordem de referência, o ângulo é mantido dentro de um faixa preestabelecida com ajuda dos *taps* dos transformadores conversores do retificador. Já o inversor opera em controle rápido da tensão CC coordenado com o controle lento do ângulo de extinção, o controle dos *taps* dos transformadores conversores do inversor atuam para manter a tensão CC do retificador dentro de uma faixa preestabelecida.

A estrutura básica do controle do elo CCAT fornecido pela ALSTOM é apresentada na Figura 2.4. No **controle do bipolar** a ordem de potência é derivada da demanda de potência mestre (MPD - *Master Power Demand*) do operador e pelas contribuições da ação integral do controle de frequência (CFC - *Constant Frequency Control*) e dos sinais do Controle Mestre. A ordem resultante é distribuída entre os dois polos do respectivo bipolar. Também são definidas as rampas e limites de

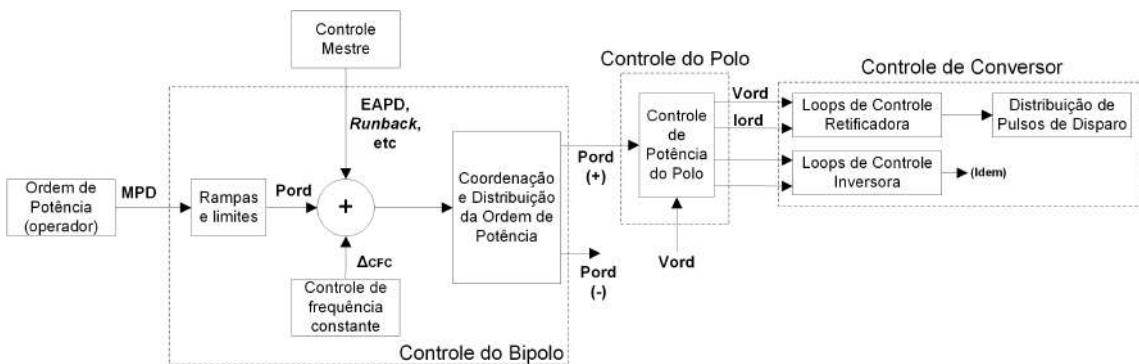


Figura 2.4: Diagrama de blocos da estrutura básica do controle da ALSTOM.

Fonte: [29].

potência.

O **controle do polo** determina e coordena as ordens de corrente a serem encaminhadas para a retificadora e inversora, estando sujeito ao limitador de sobrecarga de curta duração (STOL). Além disso, são definidos as funções de ação proporcional do controle de frequência (PFC - *Power-Frequency Control*) e o amortecimento de oscilações eletromecânicas (POD - *Power Oscillation Damping*). A ordem de tensão ( $V_{ord}$ ) é fixado em 1 pu para o modo de tensão CC normal.

Já no **controle de conversor**, a ordem de corrente está sujeita ao limitador de corrente dependente da tensão (VDCOL) antes de ser encaminhada aos *loops* de controle, conhecidos por *phase loops*. Estas malhas, trabalhando em paralelo, determinam tanto a característica dinâmica quanto a estática Vd-Id do controle e são implementados a fim de garantir uma operação segura e um desempenho apropriado do elo. Cada *loop* gera um sinal de erro que é selecionado através de uma lógica de decisão, o sinal mais adequado é encaminhado ao controle de disparo. As diversas malhas de controle assumem o controle transitoriamente durante condições anormais, porém, em regime permanente de operação, o *loop* de corrente CC (Idc) está no controle na retificadora e o *loop* de tensão CC e ângulo de extinção em cascata ( $Vdc/\gamma$  em cascata) está no controle na inversora.

Como descrito anteriormente, durante a operação os ângulos, principalmente o ângulo de extinção da inversora, são mantidos nos valores menores possíveis de maneira a minimizar as perdas e o consumo de potência reativa. Esta filosofia é economicamente vantajosa para os equipamentos do elo envolvidos na estação inversora, porém, do ponto de vista do sistema CA, é potencialmente instável sob certas condições. O controle de  $\gamma$  constante que atende esta filosofia será descrito na seção 2.6.3, e caso seja empregado, o inversor apresenta uma característica de impedância negativa vista pelo sistema CA, ou seja, uma redução na tensão CA provoca um aumento do reativo absorvido e vice-versa. Minimizando o impacto deste controle, a ALSTOM emprega o *loop*  $Vdc/\gamma$  em cascata, com um controle rápido de tensão CC em cascata com um controle lento de  $\gamma$ . O que leva à utilização de ângulos de extinção maiores em comparação ao controle de  $\gamma$  constante.

O controle de disparo, que faz parte do controle de conversor, emprega um PLO (*Phase-Locked Oscillator*) para produzir pulsos de disparos equidistantes nos instantes apropriados atingindo o ângulo de disparo desejado. Com tempo de atuação muito rápido, o PLO é aproximado por um único integrador com limites.

## 2.6 Modelo de Controle do Elo CCAT *Built-in* do ANATEM

Atualmente, o modelo *built-in* é o único presente tanto no programa ANATEM quanto no programa PACDYN, que são os empregados para as análises neste trabalho. Por conseguinte, a seguir é detalhado o controle do Elo CCAT *Built-in* do ANATEM, que é baseado nos controles do elo de CC de Itaipu, fornecido pela ABB.

O objetivo principal é manter a corrente da linha dentro de uma faixa especificada, ação realizada pelo controle do elo CCAT. O controle de corrente pode ser efetuado em ambas estações, retificadora ou inversora, uma vez que estas estão dotadas com os mesmos sistemas de controle como apresentado na Figura 2.5.

Além desta função primária, é desejável que o controle tenha as seguintes características: limitar a corrente máxima, devido ao limite térmico das válvulas conversoras; manter a máxima tensão CC, reduzindo as perdas; minimizar o consumo de reativo, as pontes conversoras devem operar com baixos ângulos de disparo; e outras características, como a modulação de potência.

No entanto, como dito anteriormente, em condições normais a estação retificadora opera controlando a corrente enquanto a estação inversora controla o seu ângulo de extinção. Nestas condições, o controle principal atuante no retificador é o controlador de corrente (CCA) ao passo que a mesma malha permanece saturada no inversor, em função da margem de corrente ajustada ( $I_{marg}$ ) definida no seu controlador de corrente. Esta forma de controle é conhecida como método da margem de corrente e a condição de operação como modo de operação normal.

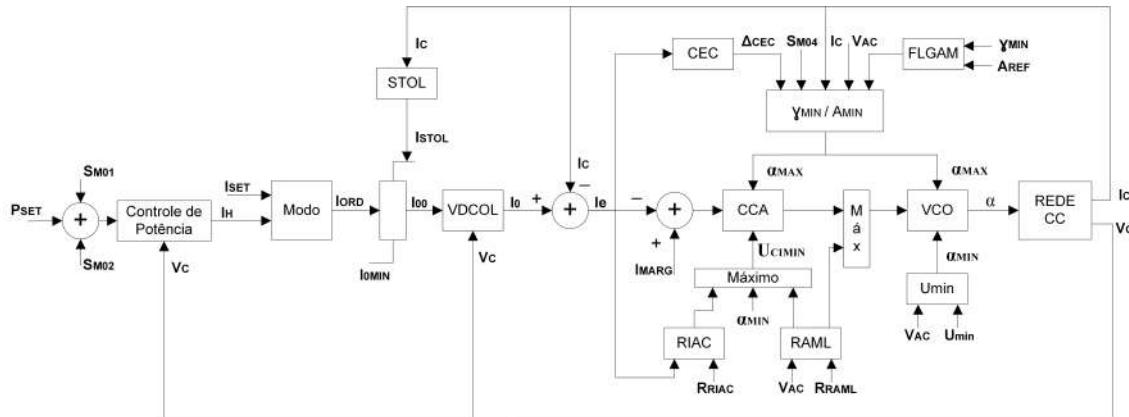


Figura 2.5: Diagrama de blocos do controle do Elo CCAT. Fonte: [30].

Condições de operação anormais causadas por alguma condição sistêmica ou por alguma falta, por exemplo, a queda da tensão CA da barra retificadora, são refletidas no controle do elo CCAT. O exemplo em questão é percebido pelo controlador de corrente CCA do retificador que atua no sentido a aumentar a tensão CC diminuindo

o ângulo de disparo  $\alpha$ . Caso o limite do ângulo de disparo seja alcançado,  $\alpha_{min} = 5^\circ$ , o controle de corrente passa a ser realizado pelo inversor através de variações do seu ângulo de extinção  $\gamma$ . Esta condição será mantida até que ocorra uma recuperação da tensão para os valores nominais ou até que a atuação dos *taps* dos transformadores conversores elevem a tensão. Condição de operação conhecido por modo de operação reduzido.

Condições ideais seriam alcançadas se a operação das pontes conversoras fossem realizadas com os ângulos de disparo, para o caso do retificador, e extinção, para o caso do inversor, com valores iguais a zero. Porém, no caso do conversor operando como retificador para assegurar o disparo simultâneo dos tiristores em série que compõem a válvula é necessário atrasar o disparo de maneira a ter um certo nível de tensão nos terminais de cada um. Já no caso do conversor operando como inversor para assegurar a comutação entre válvulas é necessário um intervalo mínimo para a recuperação da capacidade de bloqueio da válvula que está deixando de conduzir. Caso esta capacidade de bloqueio não seja restabelecida a válvula retomará a condução, condição que caracteriza um falha de comutação.

Tais requisitos são atingidos operando-se o conversor retificador com ângulo de disparo mínimo,  $\alpha_{min} = 5^\circ$ , e o conversor inversor com ângulo de extinção mínimo,  $\gamma_{min} = 17^\circ$ . A operação nestes limites são ditas de modo de operação a ângulo de ignição constante (CIA - *constant ignition angle*) e modo de operação a ângulo de extinção constante (CEA - *constant extinction angle*). Dado que em geral a potência de curto-circuito da rede CA associada à inversora é menor que a associada a retificadora, variações de potência reativa são prejudiciais na inversora, acarretando variações de tensão CA e, portanto, possíveis falhas de comutação. Portanto, o controle do ângulo de extinção do conversor operando como inversor é crítico para o sistema.

### 2.6.1 Controle do bipolo

O **controle do bipolo**, recebe a ordem de potência a ser transmitida ( $Pset$ ) pelo elo CCAT, que por sua vez encarrega-se de gerar a ordem de corrente ( $Iord$ ) a ser fornecida aos controles dos polos, quando empregado o modo de controle de potência constante. Assim, o valor de  $Iord$  não é um valor estático, estando sujeito a variações do  $Pset$  e da tensão CC ( $Vc$ ), e eventualmente a sinais de modulação de potência ( $SM01$  e  $SM02$ ). O diagrama do controle do bipolo é apresentado na Figura 2.6.

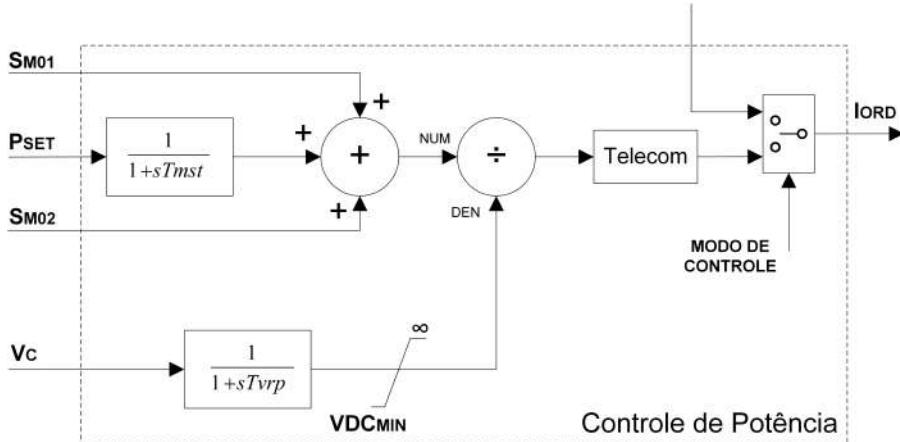


Figura 2.6: Diagrama de blocos do controle de potência. Fonte: [30].

O comportamento do elo CCAT em regime transitório se torna mais satisfatório quando operado em modo de corrente constante, visto que no modo potência constante requer um maior suprimento de reativo. Esta característica transitória é obtida com a filtragem da tensão CC, contendo a constante de tempo  $T_{vrp}$ , que por sua vez está sujeito a seguinte condição: caso a variação negativa no tempo de  $Vc$  for maior que a taxa de redução definida pelo usuário, o controle interpretará que houve uma falta e congelará o sinal de tensão durante um período mínimo até que o valor de  $Vc$  supere o valor de  $Vdc_{min}$ . Condição conhecida como **congelamento da tensão CC**.

Além do modo de controle de potência constante, o controle do bipolo possui a alternativa de seleção do modo de corrente constante, utilizado quando há ocorrência de defeitos no sistema de telecomunicação ou no controlador principal.

A lógica da telecomunicação entre as estações retificadora e inversora é representada por blocos de atraso com a constante de tempo  $Telecom$ . O atraso de telecomunicação é diferente para os terminais retificador e inversor, uma vez que no caso de diminuição da ordem esta só deve ser enviada ao retificador depois de confirmado o recebimento pelo terminal inversor, conforme Figura 2.7.

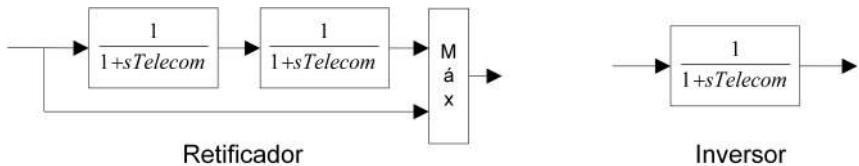


Figura 2.7: Diagrama de blocos do atraso de telecomunicação. Fonte: [30].

A capacidade de variação da potência CC transmitida, aumentando ou diminuindo o fluxo em função da variação de um parâmetro específico, é normalmente

denominado como **modulação de potência**. O parâmetro a ser utilizado varia em função do requerimento do projeto podendo ser a variação da velocidade da máquina em função da velocidade síncrona, a variação da frequência de uma barra, a variação do ângulo da tensão de uma barra, a variação do fluxo de potência em uma linha, entre outros.

Esta característica permite modular a potência com sinais externos a uma velocidade extremadamente rápida, contribuindo com o amortecimento de oscilações eletromecânicas no sistema CA. Os elos em CCAT associados a Itaipu e ao Rio Madeira possuem este tipo controlador, os parâmetros utilizados são o desvio de velocidade angular da máquina em relação à velocidade síncrona e a frequência do sistema CA, respectivamente.

Outro aspecto importante dos sistemas CCAT é a possibilidade de operar com sobrecarga de curta e longa duração. No primeiro caso é definido um acréscimo máximo de corrente de curta duração ( $STMAX$ ), que caso seja necessário é controlado pelo **controle de sobrecarga de corrente** (STOL - *Short-Time Overload Limiter*). Este controle leva em consideração o aquecimento máximo admissível ( $A_{max}$ ) dos equipamentos, considerando o valor do acréscimo de corrente do conversor ( $Y_{alim}$ ) que provoca este efeito. A ação do STOL é limitar  $I_{ord}$  através do monitoramento do aquecimento das válvulas e transformadores em função do tempo que a corrente no elo permanece acima do valor nominal, conforme Figura 2.8.

Caso o ganho do limitador de corrente de longa duração ( $G_{max}$ ) seja nulo, o controle de sobrecarga é ignorado e o limite de sobrecarga fica constante e igual a  $STMAX$ . Quando ocorre a perda de um polo, o outro polo do mesmo bipolo assume instantaneamente a potência do polo bloqueado até o limite de sua capacidade máxima de potência e o excedente é transferido para o outro bipolo.

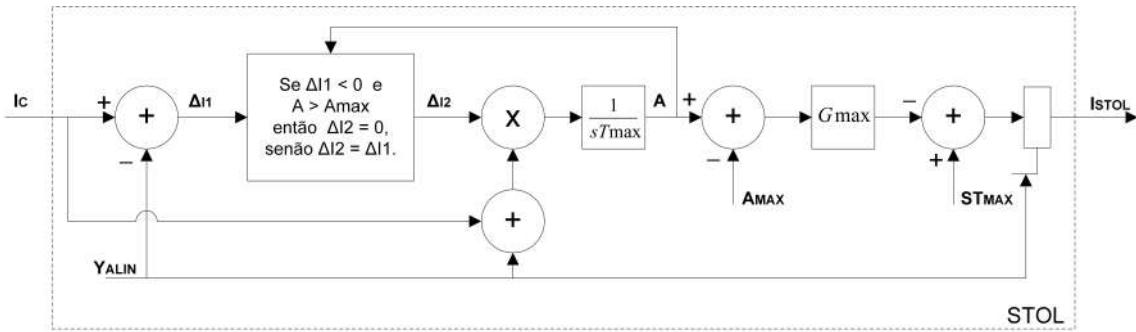


Figura 2.8: Diagrama de blocos do controle de sobrecarga de corrente - STOL.

Fonte: [30].

## 2.6.2 Controle do polo

A ordem de corrente procedente do controle de potência passa a ser comparada com a corrente medida da linha CC, gerando um sinal proporcional a este erro a partir de um regulador de corrente, mas não sem antes ser ponderada por uma outra malha de controle.

A ponderação é realizada pelo **limitador da ordem de corrente dependente da tensão** (VDCOL - *Voltage Dependent Current Order Limiter*), que altera ou não o valor de  $I_{ord}$  em função da tensão  $V_c$  medida após o reator de alisamento. A alteração é realizada aplicando um fator de redução ( $F_R$ ) sujeito a uma faixa de atuação, dado por um valor mínimo de tensão abaixo da qual a ordem de corrente não sofre mais redução ( $V_{dcl,min}$ ) e por um valor abaixo do qual a ordem de corrente começa a sofrer a redução ( $V_{dcl,max}$ ) do VDCOL. O valor da tensão  $V_c$  medido e normalizado por  $V_{DCRNL}$  é empregado através de um bloco cuja constante de tempo é não-linear ( $T_{vdcl}$ ), de forma que  $I_{ord}$  é diminuído com rapidez (constante de tempo de descida  $T_{vdcl,d}$ ) para quedas bruscas de tensão e aumentado de forma mais lenta (constante de tempo de subida  $T_{vdcl,s}$ ) para a recuperação da tensão. Conforme diagrama apresentado na Figura 2.9.

A nova ordem de corrente ( $I_0$ ), ponderada ou não, é comparada com a corrente medida da linha, o erro de corrente resultante ( $I_e$ ) é levado ao **amplificador de controle de corrente** (CCA - *Current Control Amplifier*), que gera um sinal de tensão proporcional ( $U_c$ ), conforme Figura 2.10.

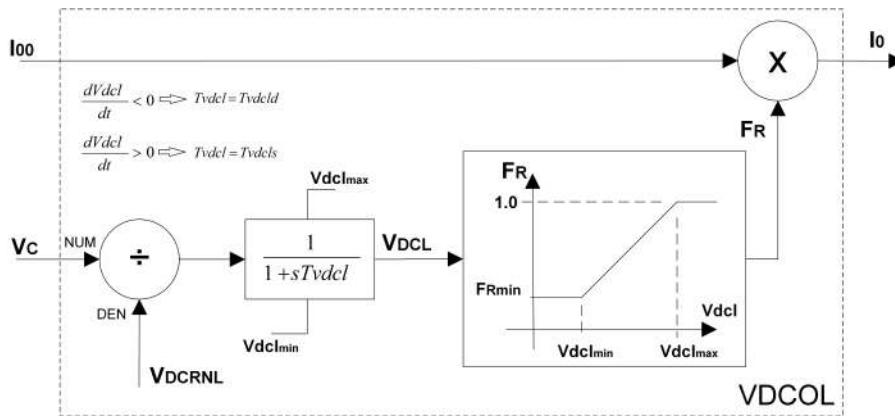


Figura 2.9: Diagrama de blocos do limitador da ordem de corrente dependente da tensão - VDCOL. Fonte: [30].

O CCA é um regulador modelado como um controlador tipo proporcional-integral (PI), tendo um bloco proporcional (ganho  $K_{P_{CCA}}$ ) em paralelo outro integral (ganho  $K_{I_{CCA}}$ ). Este regulador atua no sentido de manter a corrente do elo igual a referência  $I_0$ , que é o próprio  $I_{ord}$  procedente do controle de potência ponderado pelo VDCOL.

A função de manter a corrente igual a referência é explicado a seguir. Para valores de  $I_c$  menores (maiores) que  $I_0$ , o CCA do retificador atua no sentido a diminuir (aumentar)  $\alpha$ , aumentando (diminuindo) a tensão  $V_{dr}$  e consequentemente a corrente da linha  $I_d$ , conforme Equação 2.1.

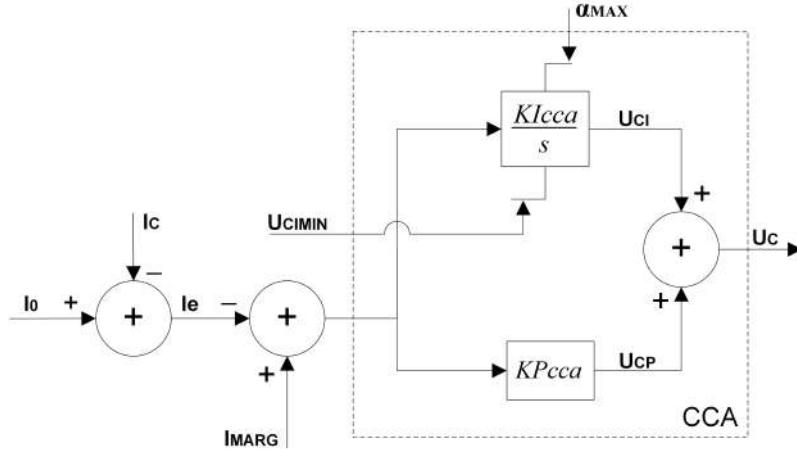


Figura 2.10: Diagrama de blocos do amplificador de controle de corrente - CCA.  
Fonte: [30].

A estrutura do CCA do conversor operando como inversor é a mesma que a empregada no retificador, porém além do sinal  $I_e$  o inversor recebe um sinal adicional denominado como margem de corrente ( $I_{marg}$ ). Em regime permanente o erro de corrente ( $I_c - I_0$ ) é zero,  $I_{marg}$ , que é um sinal positivo, é continuamente integrado pelo controlador PI causando intencionalmente a sua saturação no valor limite do canal integral, portanto, o controle principal do inversor é o controle de  $\alpha_{max}$ , o que equivale a um ângulo mínimo de extinção. Portanto, para o inversor o valor de  $\alpha_{max}$  permitido é variável, enquanto que o  $\alpha_{min}$  é constante.

Para o retificador o ângulo máximo de disparo ( $\alpha_{max}$ ) permitido é constante, enquanto que o ângulo mínimo de disparo ( $\alpha_{min}$ ) permitido é variável. O  $\alpha_{min}$  leva em consideração variações da tensão CA ( $V_{ca_r}$ ), através do bloco RAML, variações do erro de corrente ( $I_e$ ), através do RIAC, e o valor mínimo especificado para o conversor ( $\alpha_{min(t=0)}$ ). Consideração realizada através de um seletor de máximo, mas que geralmente é mantido constante em  $\alpha_{min(t=0)}$ , conforme diagrama apresentado na Figura 2.11.

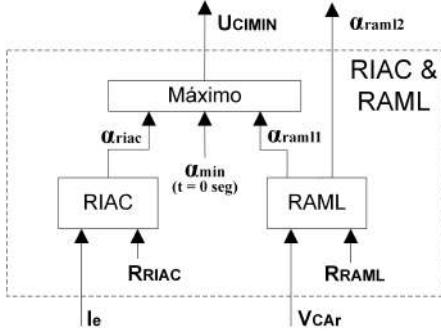


Figura 2.11: Diagrama de blocos do seletor de máximo para o  $\alpha_{min}$ . Fonte: [30].

### 2.6.3 Controle da ponte conversora

O sinal de tensão proporcional é enviado ao **oscilador controlado por tensão** (VCO - *Voltage Controlled Oscillator*), circuito responsável pela geração dos trens de pulsos para as válvulas conversoras de forma a manter o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) no valor desejado. Sendo um oscilador cuja frequência é dependente do sinal de tensão de entrada, o VCO possui constantes de tempo muito pequenas. Desse modo, quando representado, é modelado por um bloco atrasador com uma constante de tempo ( $T_{vco}$ ) pequena, conforme diagrama apresentado na Figura 2.12.

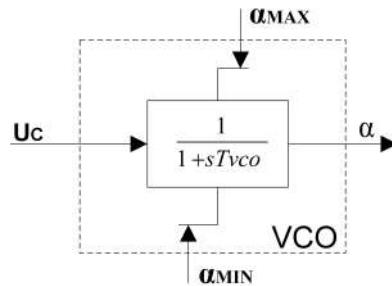


Figura 2.12: Modelo do oscilador controlado por tensão - VCO. Fonte: [30].

O controle da ponte conversora também é responsável pela imposição dos limites aos ângulos de disparo, descrito brevemente mais acima. Neste contexto, está o limite dinâmico de  $\alpha_{max}$  imposto ao CCA e ao VCO do inversor, visto a necessidade de se operar com o ângulo de extinção no valor mínimo ( $\gamma_{min}$ ) conhecido como modo de operação CEA, implicando uma reavaliação de  $\alpha_{max}$  a cada instante, dado pela seguinte equação:

$$\cos \alpha_{max} = \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{3} E_m} - \cos \gamma_{min}$$

Assim, de acordo com a expressão acima, o **controle por ângulo de extinção mínimo** ( $GAMMA_{min}$ ) atua sobre o  $\alpha_{max}$  para variações de corrente no elo e para variações da tensão CA do sistema conectado ao inversor, proporcionando o ângulo necessário para comutação perfeita. Note que o valor de  $\cos \gamma_{min}$  é fixo. O diagrama da Figura 2.13 apresenta ainda uma outra opção para o controle do inversor. A escolha do modo do controle é realizado através da opção *FLGAM*.

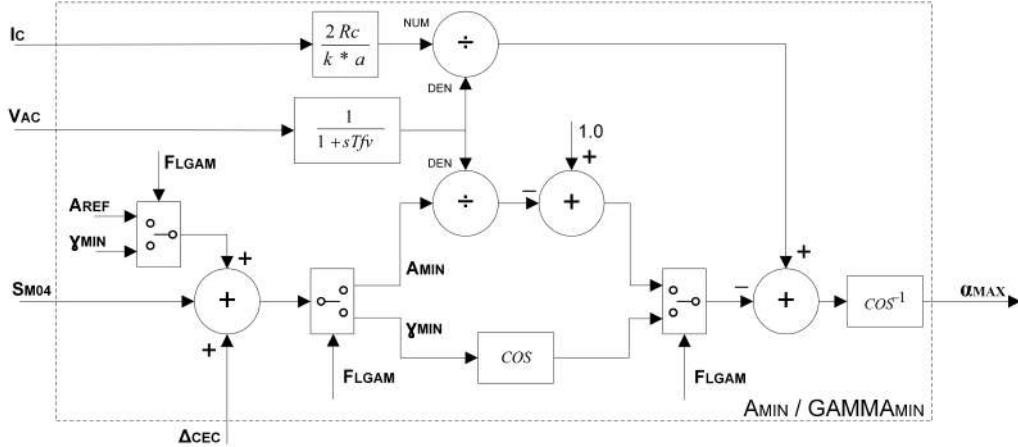


Figura 2.13: Diagrama de blocos do controle de  $GAMMA_{min}$  e  $A_{min}$ . Fonte: [30].

A outra opção de controle, denominado como **controle por área mínima** ( $A_{min}$ ), procura manter constante o valor da área de margem de comutação através de um sistema preditivo realimentado, onde se comprar o valor previsto de área de margem com uma referência ( $A_{ref}$ ) e o erro medido de previsão corrige as próximas previsões. A previsão é executada monitorando-se continuamente a tensão de comutação da válvula a ser extinta e o tempo que falta para a reversão dessa tensão. O valor de área prevista é calculada a partir da área sob a curva da tensão de comutação pela aproximação da área da senoide pela área de um triângulo, subtraindo-se a área relativa a comutação. O disparo da válvula é liberado no momento em que a área prevista iguala a ( $A_{ref}$ ).

Observe que no diagrama da Figura 2.13 o controle de  $GAMMA_{min}$  e  $A_{min}$  dispõe de mais duas entradas. Uma para a possibilidade da modulação de  $\gamma$  ( $SM04$ ), podendo ser empregado para a variação do fator de potência e, por conseguinte, a tensão CA do sistema inversor. E outra procedente do **controle de erro da corrente** (CEC - *Current Error Control*) designado por  $\Delta_{CEC}$ , explicado a seguir.

A intersecção das características estáticas, Figura 2.3, do retificador operando com  $\alpha_{min}$ , segmento AB, e o inversor em CEA, segmento J'K, pode não estar bem definida em certos níveis de tensão perto da transição entre o controle CEA e o controle de corrente por parte do inversor, ou seja, entre  $Id_{or}$  e  $Id_{oi}$ . Quando a reatância equivalente do sistema CA conectado ao inversor é elevado, caracterizando

um sistema fraco, passam a existir três pontos de operação possíveis, conhecido por instabilidade de três pontos. Para evitar este problema é alterado a característica estática do inversor, resultante da ação do CEC, que consiste em se ter o retificador preso com  $\alpha_{min}$  e o inversor controlando a corrente num valor tal que obedeça o segmento JP. Apesar do CEC ter sido proposto para resolver este problema, sua ação também está presente durante transitórios quando ocorre variações na corrente da linha CC (aumento ou decréscimo). Durante os transitórios, por exemplo um decréscimo da corrente CC, o CEC atua no sentido de aumentar o ângulo de extinção da inversora rapidamente, permitindo uma recuperação da corrente mais adequada. Sem este controle, o controle do retificador teria que trabalhar com um ângulo de disparo maior que o de regime permanente ( $17^\circ$ ), para se obter uma atuação satisfatória transitoriamente.

Ação realizada através da modificação adequada de  $\gamma_{min}$  pelo  $\Delta_{CEC}$  do CEC. Como o inversor normalmente opera em modo CEA, somente são permitidos variações positivas de  $\gamma$ . A Figura 2.14 apresenta o diagrama deste controle, definindo dois valores de ganhos distintos de acordo com a opção do *FLGAM*, o  $K_{ceca}$  para o controle do inversor em  $A_{min}$  e  $K_{cecg}$  para  $GAMMA_{min}$ .

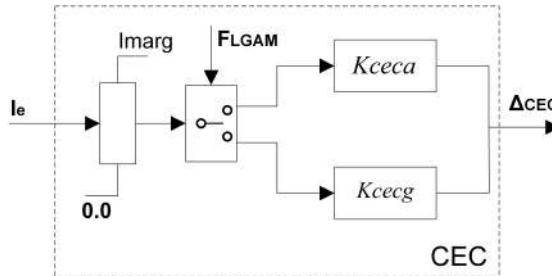


Figura 2.14: Diagrama de blocos do controle de erro da corrente - CEC. Fonte: [30].

No caso do retificador, as limitações impostas ao ângulo de disparo correspondem aos blocos apresentados no diagrama da Figura 2.11. São eles o **limitador de alfa do integrador do retificador** (RIAC - *Rectifier integrator alpha clamp*) e o **limitador de alfa mínimo do retificador** (RAML - *Rectifier alpha min limiter*) correspondentes ao CCA e o bloco da **tensão mínima de polarização** ( $U_{min}$ ) correspondente ao VCO.

O RIAC atua para variações de sinais de erro de corrente ( $I_e$ ) filtrados por um bloco atrasador (constante de tempo  $T_{riac}$ ) maiores que um valor de referência ( $REF_{riac}$ ), alterando a sua saída para um valor de  $\alpha$  mínimo ( $ARIAC_{max}$ ) por um tempo mínimo de  $Toff1$  segundos. Ficando bloqueado para novas atuações por um tempo de  $Toff2$  segundos. Este controle é empregado com a finalidade de aumentar os amortecimentos através do CCA do retificador, alterando o limite inferior

do ramo integral, fazendo com que o CCA transitoriamente seja um amplificador proporcional.

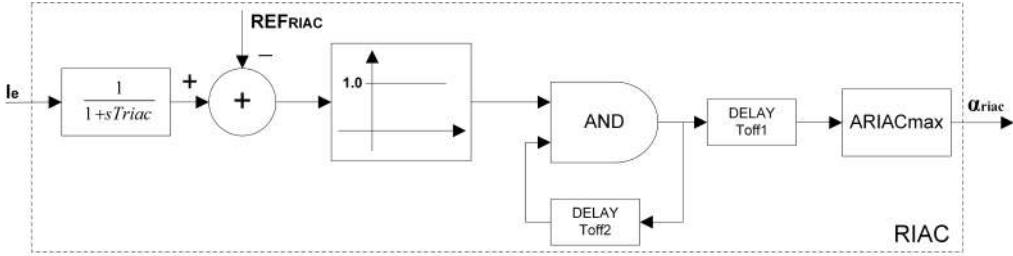


Figura 2.15: Diagrama de blocos do limitador de alfa do integrador do retificador - RIAC. Fonte: [30].

O RAML atua para variações da tensão CA da barra de interface do retificador ( $V_{ca_r}$ ) abaixo de um valor de referência ( $REFAML$ ), sujeito a uma redução por um período mínimo de  $Ton1$  segundos para alteração da primeira saída ( $\alpha_{raml1}$ ) e um período de  $Ton1 + Ton2$  segundos para alteração da segunda saída ( $\alpha_{raml2}$ ), conforme Figura 2.11. A segunda saída é submetida a um seletor de máximo, onde é comparado ao sinal de saída do CCA, conforme Figura 2.5. Este controle é empregado com o intuito de que o sistema CC apresente uma recuperação mais suave para faltas no sistema CA do retificador. Sem este controle, durante a falta, o CCA do retificador atuaria no sentido de diminuir o ângulo de disparo tentando manter a tensão CC do sistema e, consequentemente, causando um maior afundamento de tensão CA da barra de interface.

## 2.7 A Relação de Curto-circuito

A natureza das interações CA/CC e os problemas associados a este dependem bastante da relação de curto-circuito (SCR - *short circuit ratio*) no ponto de conexão do elo CCAT [21]. Esta relação é amplamente utilizada de maneira conveniente para relacionar a potência transmitida pelo elo CCAT com a potência CA disponível no sistema, sendo uma relação entre a potência de curto-circuito trifásica da barra de interface e a máxima potência CC transmitida pelo elo CCAT, conforme Equação 2.4. Este parâmetro provê um bom indicativo quanto à robustez do sistema CA frente a injeção de potência por um elo CCAT.

Um sistema CA pode ser considerado fraco de dois pontos de vista, se na barra de interface sua impedância equivalente for alta ou sua inércia mecânica for baixa [21]. As duas condições anteriores representam um nível de curto-circuito baixo, o que leva a valores baixos da relação de curto-circuito no ponto analisado.

$$SCR = \frac{S_{3\phi}}{P_{DC}} \quad (2.4)$$

Um compensador síncrono claramente incrementa a corrente de curto-círcuito (aumento de inércia do sistema) no ponto de conexão e, consequentemente, o SCR. Em contrapartida, bancos de capacitores em derivação reduzem o SCR. O banco de capacitores incluindo os filtros CA conectados às barras de interface de um elo CCAT elevam significativamente a impedância equivalente do sistema no ponto [14]. Por conseguinte, a Equação 2.4 é modificada para levar em consideração os efeitos destes equipamentos associados ao elo, denominado ESCR (*Effective Short Circuit Ratio*), conforme Equação 2.5.

$$ESCR = \frac{S_{3\phi} - Q_c}{P_{DC}} \quad (2.5)$$

Na prática a razão  $S_{3\phi}/P_{DC}$  irá variar devido as alterações na configuração do sistema CA e devido aos diferentes níveis de potência CC sendo transmitido pelo elo CCAT. Neste contexto aparece o SCR operacional ou OSCR (*Operating Short Circuit Ratio*). Portanto, deve ser lembrado que é o OSCR que é importante e que se refere à potência CC atual e a sua correspondente  $S_{3\phi}$ . Normalmente o OSCR vai ser maior que o SCR especificado para o sistema, visto que, normalmente a transmissão se da abaixo da potência nominal [14].

Tradicionalmente, a relação de curto-círcito era classificada em [31]

- Forte                     $SCR > 5;$
- Moderado               $SCR = 3 - 5;$
- Fraco                   $SCR = 2 - 3;$
- Muito Fraco            $SCR < 2.$

porém, visto que os controles dos elos CCAT foram sendo refinados e que estes desempenham um papel importante na maioria das interações CA/CC, novas classificações foram propostas [32]:

- Forte                     $SCR > 3 \quad ESCR > 2.5;$
- Fraco                   $SCR = 2 - 3 \quad ESCR = 1.5 - 2.5;$
- Muito Fraco            $SCR < 2 \quad ESCR < 1.5.$

O barra de interface do inversor, ou o terminal inversor, é a parte mais sensível a variação da relação de curto-círcito. Pode-se dizer que o SCR determinará a velocidade máxima com que a potência CC poderá ser restabelecida depois da ocorrência de uma falta CC ou CA. Os problemas associados à operação de elos CCAT conectados a sistemas com baixo SCR ou ESCR podem ser [21]:

- Altas sobretensões dinâmicas, relacionado ao alto valor de potência reativa absorvida durante a operação de um elo CCAT. Para uma interrupção do sistema CC, o consumo de reativo cai para zero, resultando em um aumento excessivo da tensão CA.
- Instabilidade de tensão, relacionado ao terminal inversor. Quando em operação, tanto as tensões CC como as CA são muito sensível a mudanças na carga, por exemplo, um incremento da corrente CC é acompanhado por uma queda da tensão CA. O controle da tensão e a recuperação de uma perturbação tornam-se difíceis. Neste caso, a resposta do sistema CC contribui ao colapso do sistema CA.
- Ressonância harmônica, relacionado aos capacitores CA, os filtros CA e os baixos harmônicos do sistema CA. Enquanto capacitores tendem a diminuir as frequências de ressonância do sistema CA, os elementos indutivos (linha de transmissão e máquinas) tendem a aumentar. Caso muitos capacitores sejam usados, a frequência natural pode cair a valores suficientes para a ocorrência de uma ressonância entre os elementos indutivos e a compensação paralela.
- *Flicker* de tensão, relacionado ao chaveamento dos capacitores e reatores na vizinhança das estações conversoras, causando variações elevadas, ou seja, *flickers* de tensão. Estes tendem a aumentar quanto maior for a potência transmitida pelo elo CCAT.

## 2.8 A Característica do Elo CCAT no Âmbito de Pequenas Perturbações

### 2.8.1 Estabilidade de sistemas elétricos de potência

Sistemas elétricos de potência estão expostos a perturbações de todo tipo, afetando sempre o equilíbrio operativo. A capacidade de recuperar uma condição de equilíbrio após a perturbação é o que definirá se o sistema ficará estável ou não.

O SEP é fortemente não-linear, operando constantemente com mudanças nos seus parâmetros: cargas, geração, topologia, atuação de controladores, entre outros. Quando sujeito a um distúrbio, a estabilidade do sistema depende, principalmente, do ponto de operação inicial como da natureza do distúrbio. Estes podem ser, pequenos ou grandes. Pequenos distúrbios ocorrem continuamente sob a forma de mudanças de carga, o sistema deve ser capaz de se ajustar a estas condições e operar satisfatoriamente. Deve também ser capaz de suportar grandes distúrbios, como um curto-circuito ou corte de geração.

Apesar da estabilidade em sistemas elétricos ser um problema único, esta é classificada de acordo com os fatores que a influenciam, considerando: a natureza física da instabilidade; o tamanho da perturbação; os equipamentos, processos e o período de tempo que deve ser considerado [5].

A **estabilidade de frequência** refere-se à capacidade de um sistema elétrico de manter a sua frequência estável após ser submetido a uma perturbação grave resultando em um desequilíbrio significativo entre carga e geração.

A **estabilidade de tensão** refere-se à capacidade de um sistema elétrico de manter a tensão estável em todas as barras do sistema após ser submetido a uma perturbação.

A **estabilidade angular** refere-se à capacidade de manutenção do sincronismo entre máquinas após o sistema ter sido submetido a uma perturbação. Dependente da capacidade de restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e mecânico de cada máquina do sistema. O torque eletromagnético de uma máquina pode ser decomposta em torque sincronizante e torque de amortecimento, e a estabilidade do sistema depende da existência destes dois componentes. É dividida em estabilidade transitória (*transient stability*) e estabilidade a pequenas perturbações (*small signal stability*). A primeira é associada a grandes distúrbios, envolvendo grandes excursões dos ângulos dos geradores e influenciada amplamente pela característica não-linear do sistema.

### 2.8.2 Estabilidade a pequenas perturbações e elos CCAT

A estabilidade a pequenas perturbações é a capacidade do sistema de se manter em sincronismo após sofrer uma pequena perturbação. Um distúrbio é considerado ser suficientemente pequeno que a linearização das equações do sistema é possível para fins de análise [5].

A linearização do sistema, diz a respeito desta análise, ou seja, os estudos a pequenas perturbações são realizados em torno de um ponto de operação. Conceitos básicos relacionados a esta análise podem ser encontrados no Apêndice A.

Por conseguinte, no âmbito de um estudo de pequenas perturbações, o sistema de corrente contínua usualmente se encontrará operando no modo normal de operação [27]. O modo normal de operação do elo CCAT, ou modo de operação em regime permanente, consiste em manter constante o ângulo de disparo  $\alpha$  da retificadora, controlando a corrente ou potência, segmento BPC da característica estática do retificador apresentado na Figura 2.3. Ao passo que, o inversor mantém seu ângulo de extinção no valor mínimo, controlando a tensão, segmento PK da característica estática do inversor. Em outras palavras, o conversor retificador controla a corrente e o conversor inversor controla a tensão.

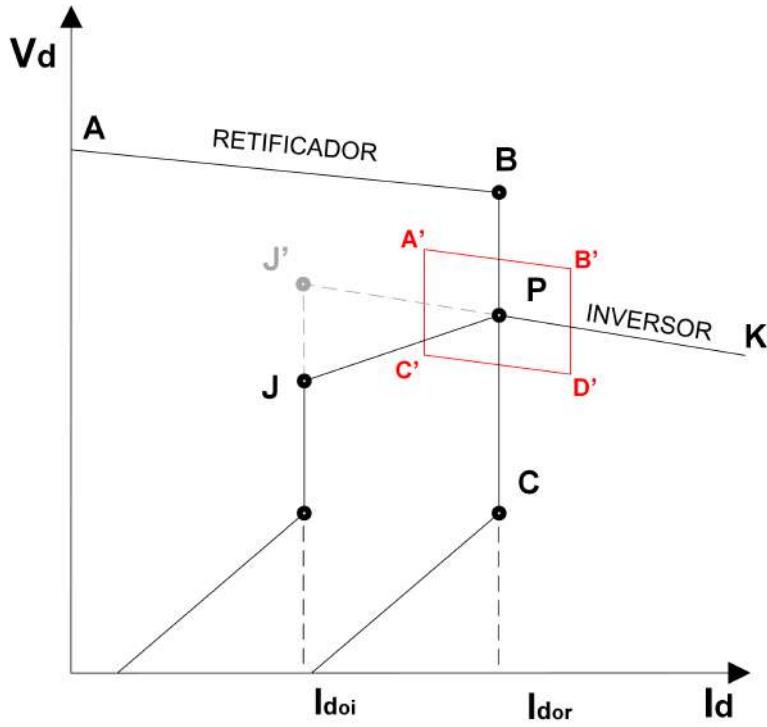


Figura 2.16: Região de interesse da característica estática  $V_d$ - $I_d$  no âmbito de pequenas perturbações.

A Figura 2.16 apresenta a região de interesse da característica estática para os estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Esta região é delimitada pela área formada por  $A'B'C'D'$ , observe que o ponto  $A'$  para  $B'$ , ou de  $C'$  para  $D'$ , representam a aproximação da corrente ( $\Delta I$ ) ao ponto de operação  $P$ , e que as variações de  $A'$  para  $C'$ , ou  $B'$  para  $D'$ , representam a aproximação do ângulo de extinção ( $\Delta\gamma$ ) ao ponto de operação  $P$ .

### 2.8.3 Representação do controle do elo CCAT em programas de estabilidade a pequenos sinais

Considerando o modo de operação normal, os controles do elo a nível de polo, seção 2.6.2, e ponte conversora, seção 2.6.3, suficientes para representar esta condição operativa são o CCA e o VCO. A Figura 2.17 apresenta a representação do CCA e do VCO em programas de estudos de estabilidade a pequenas perturbações.

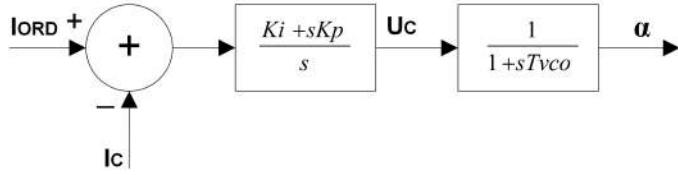


Figura 2.17: Diagrama de blocos do CCA e VCO em estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Baseado em [28].

Caso seja empregado o modo de controle de potência constante, a ordem de corrente é obtida através da ordem de potência e a tensão CC medida, seção 2.6.1. A Figura 2.18 apresenta o diagrama de blocos do controle de potência para estudos de estabilidade a pequenas perturbações.

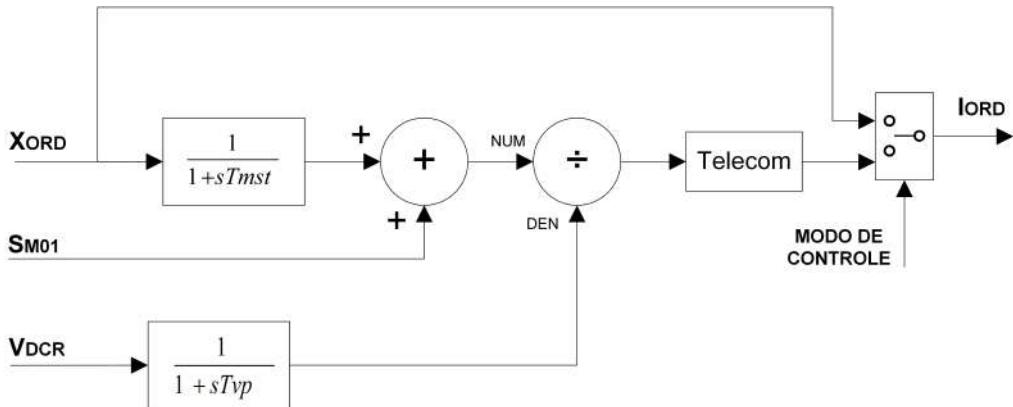


Figura 2.18: Diagrama de blocos do controle de potência em estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Baseado em [28].

Porém, os controles apresentados anteriormente somente constituem a condição necessária para a representação da característica estática do retificador a pequenas perturbações. No modo de operação normal, o CCA do inversor encontra-se saturado no seu limite máximo por ação do sinal adicional da margem de corrente, consequentemente, o controle do inversor é o controle de  $\alpha_{max}$ , equivalente ao ângulo mínimo de extinção, seção 2.6.2. A Figura 2.19 apresenta o digrama de blocos do controle do conversor em condição de inversor para estudos de estabilidade a pequenas perturbações, referentes ao segmento PK da característica estática do inversor.

A região delimitada entorno do ponto de operação P, Figura 2.16, apresenta um segundo segmento para a característica estática do inversor. O segmento JP obedece a atuação do controle de erro de corrente, seção 2.6.3. Porém, devido a descontinuidade que este representa, permitindo apenas excursões positivas do seu sinal de saída, não pode ser representado na malha de controle do inversor a pequenas perturbações [27].

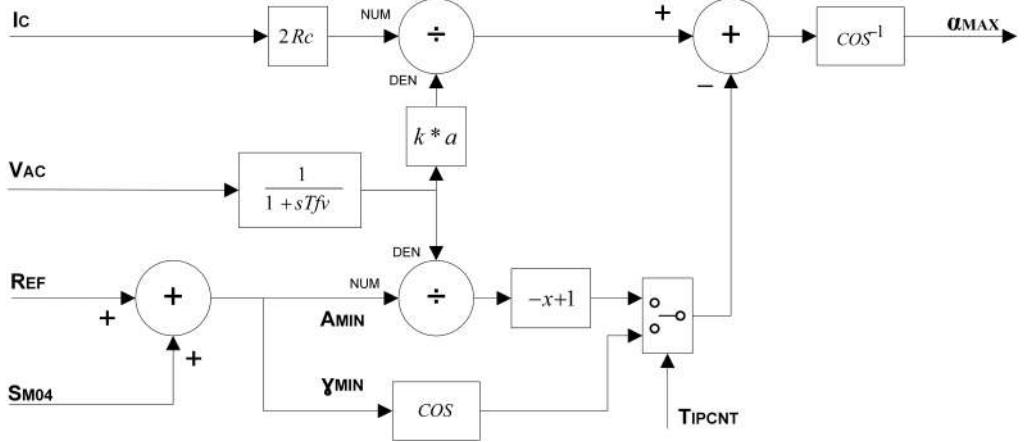


Figura 2.19: Diagrama de blocos do controle de  $GAMMA_{min}$  e  $A_{min}$  em estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Baseado em [28].

## 2.8.4 Estabilidade de tensão e bifurcações

A perturbação classificada como pequena normalmente corresponde a pequenas variações de carga ou geração, onde a configuração do sistema permanece inalterada. Tal variação de carga (perturbação) modifica o ponto de equilíbrio do sistema e, considerando que o novo ponto de equilíbrio seja estável, um novo ponto de operação é alcançado. Quando a estrutura dinâmica do sistema muda qualitativamente sob a variação de um parâmetro, o sistema é dito que sofre uma bifurcação. Normalmente o parâmetro utilizado para esta análise corresponde a uma variação lenta da carga [16].

Em SEP, bifurcações locais podem ser do tipo bifurcação Sela-Nó (BSN) ou bifurcação de Hopf (BH). Entre as bifurcações, o conceito mais difundido é o da BSN, caracterizada pelo desaparecimento súbito do ponto de equilíbrio estável do sistema. Usualmente, ocorre quando o SEP, modelado com cargas do tipo potência constante, se encontra fortemente carregado, atingindo a máxima transferência de potência e tendo como consequência um colapso de tensão. A matriz jacobiana do fluxo de potência torna-se singular e, consequentemente, sem solução no ponto onde ocorre BSN. Do ponto de vista da matriz de estados, uma BSN é associado a um autovalor cruzando a origem ao longo do eixo real [16].

A bifurcação de Hopf não está associada ao desaparecimento do ponto de equilíbrio e sim a presença de um ponto que pode ser estável ou instável, desenvolvendo ciclos limites e levando o sistema a problemas oscilatórios sustentáveis (supercrítico) ou não (subcrítico). Este tipo de bifurcação é associado a um autovalor complexo cruzando o eixo imaginário sob a variação de um parâmetro. A metodologia direta para a detecção busca encontrar o ponto de bifurcação do sistema utilizando as equações algébrico-diferenciais do sistema. Para tanto, varia-se um parâmetro e, a

cada variação, calculam-se os autovalores da matriz de estado do sistema [16].

Estudos de estabilidade de tensão são normalmente baseados nas análises das curvas PV e QV, também chamadas de curva do nariz, representando a potência ativa do sistema, a potência reativa de uma barra e a tensão de uma barra do sistema [31]. Normalmente a barra escolhida é chamada de barra piloto, tendo a sua tensão como representativa para o perfil de tensão da região na qual está inserida. Para a obtenção deste tipo de curva é empregado o método do fluxo de potência continuado, evitando o problema de convergência do método de solução de fluxo de potência Newton-Raphson perto nas proximidades da região de máxima transferência de potência. Um dos objetivos dos estudos de estabilidade de tensão é a obtenção da margem de estabilidade de um sistema, que pode ser vista como uma medida de quão próximo o ponto de operação se encontra do ponto de colapso de tensão.

A Figura 2.20 ilustra as margens de estabilidade devido às bifurcações do tipo Sela-Nó e Hopf em uma curva PV. Observa-se que a margem de estabilidade de um sistema pode ser amplamente afetada devido a uma bifurcação de Hopf, podendo levar ao colapso o sistema bem antes da máxima transferência de potência.

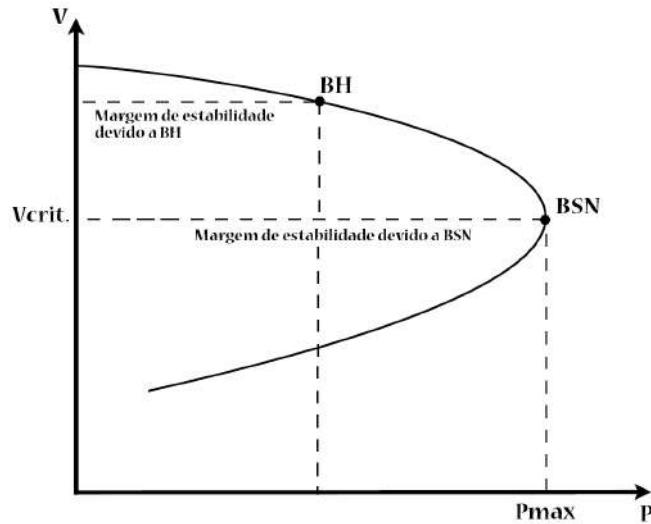


Figura 2.20: Curva PV com as margens de estabilidade devida a BSN e BH.

# Capítulo 3

## Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentadas discussões sobre os resultados das simulações realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Ainda, apresenta-se a descrição dos sistemas teste utilizados e as modificações nestes inseridas para o melhor entendimento das análises.

As análises realizadas correspondem a estudos de estabilidade frente a pequenas perturbações (*small signal stability*) de sistemas CC e CA em paralelo, assim como, quando necessário, a estudos de estabilidade frente a grandes perturbações (*transient stability*) com simulações no domínio do tempo.

Para avaliar melhor e detalhadamente o comportamento dos sistemas em estudo, apresenta-se resultados das análises modais, com autovalores (polos) da matriz de estado para distintos pontos de operação (PO), bem como os respectivos fatores de participação, *mode shapes* e lugar das raízes dos autovalores de interesse.

As simulações foram realizadas com as ferramentas computacionais de análise o ANAREDE [33], ANATEM [30], e o PACDYN [28], todos desenvolvidos pelo CEPEL. Os modelos utilizados neste trabalho estão detalhadamente descritos no banco de dados distribuído pelo ONS [34].

### 3.1 Sistema base

#### 3.1.1 Descrição do sistema base

O diagrama unifilar do primeiro sistema analisado é apresentado na Figura 3.1. Este sistema é baseado no sistema de transmissão e geração de Itaipu, onde a interconexão sul-sudeste é substituída por uma injeção equivalente, para condição de sul exportador, e a região sudeste conectada aos sistemas de transmissão CA e CC de Itaipu, também representadas por cargas equivalentes. Isto é realizado uma vez que o principal interesse é a obtenção de um sistema básico para as análises subsequentes. A modificação principal realizada com relação ao sistema original de Itaipu

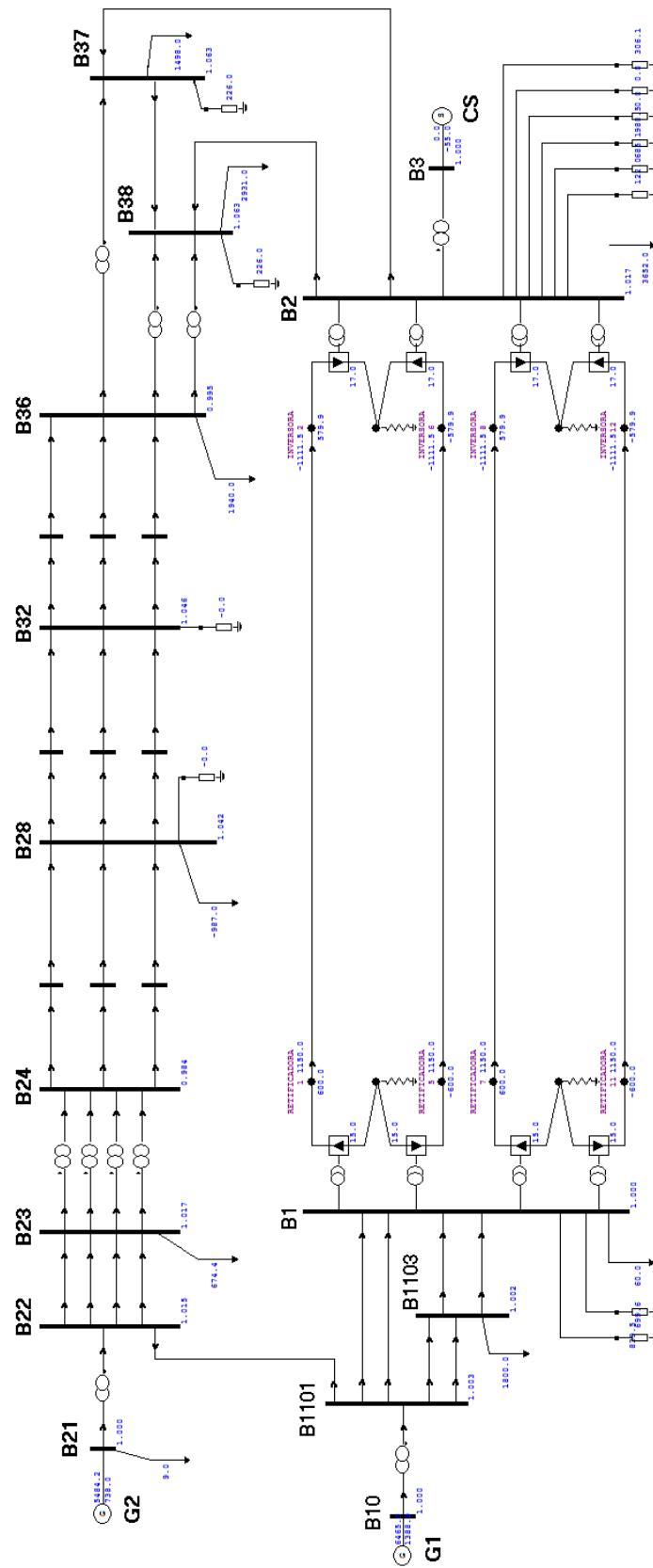


Figura 3.1: Diagrama unifilar do sistema base.

corresponde a inserção de uma linha de transmissão (LT) entre a barra 22 e a barra 1101, que neste trabalho é denominado como linha de interconexão, permitindo assim a transmissão em CA e CC em paralelo. A LT interconexão é então empregada em duas opções conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros da linha de interconexão.

Opções	R [%]	X [%]	B [Mvar]
LT interconexão 1	0.0049	0.10239	10.54
LT interconexão 2	0.14	2.36	66.0

As máquinas rotativas são representadas pelo modelo de polos salientes com seus respectivos sistemas de controle, encontrados em [34]. A geração G2 corresponde a 8 máquinas de 737 MW cada, a geração G1 corresponde a 9 máquinas de 823 MW cada, o compensador síncrono (CS) na barra inversora é composto de 4 máquinas de 300 MVA cada. O elo de transmissão CCAT está composto por dois bipolos, com capacidade de transmissão de 3150 MW cada e tensão de operação de  $\pm 600$  kV, com seu sistema de controle representado de acordo com as modelagens não-linear e linear apresentadas nas seções 2.6 e 2.8.

A Tabela 3.2 apresenta algumas das condições iniciais do sistema CC e CA junto com o perfil de tensão base derivado do resultado do fluxo de potência.

No esquemático do sistema apresentado na Figura 3.1 observa-se reatores no meio

Tabela 3.2: Condições iniciais para obtenção do ponto de operação base.

Sistema CC			
Potência Especificada (VSC)	1160	MW/polo	
Tensão Retificadora	600.0	kV	
Tensão Inversora	579.8	kV	
Potência Transmitida	1159.97	MW/polo	
Potência Recebida	1120.84	MW/polo	
Sistema CA - Geração			
Geração G1	6465	MW	
	1380	Mvar	
Geração G2	5483	MW	
	715	Mvar	
Compensador Síncrono	-54	Mvar	
Sistema CA - Perfil de tensão base			
B22	1.015 pu	B1101	1.003 pu
B23	1.018 pu	B1103	1.002 pu
B24	0.986 pu		
B28	1.045 pu	B1 (ret.)	1.0000 pu
B32	1.049 pu	B2 (inv.)	1.0170 pu
B36	0.998 pu	B3 (CS)	1.0000 pu
B37	1.066 pu	B10 (G1)	1.0000 pu
B38	1.066 pu	B21 (G2)	1.0000 pu

da transmissão CA, exatamente na barra B28 e na B32. Estes não são empregados para o caso estudado, visto que, a partir dos resultados preliminares do fluxo de potência para o ponto de operação base (1160 MW especificado para cada polo), o perfil de tensão apresenta um afundamento acentuado, apenas com a utilização do reator da barra 32.

Com a definição do ponto de operação e a modelagem dinâmica, é possível determinar os modos do sistema, incluindo os fatores de participação e os *mode shapes*. Definições que são descritas sucintamente no Apêndice A.

Aplicando os critérios de análise modal ao sistema caso base, com o ponto de operação dado, apresenta-se na Tabela 3.3 os 15 primeiros modos do sistema, com suas respectivas frequências de oscilação e amortecimentos, assim como o principal fator de participação. Cabe ressaltar que, para o detalhamento dinâmico empregado, o sistema possui um total de 115 modos de oscilação. A Figura 3.2 apresenta os autovalores do sistema. Observa-se a presença de três autovalores a serem analisados detalhadamente, correspondentes aos três primeiros modos da tabela.

Tabela 3.3: Autovalores do sistema base.

N	Real	Imaginário	Módulo	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de participação
1	<b>-0.914</b>	<b>8.243</b>	<b>8.294</b>	<b>1.312</b>	<b>11.02</b>	<b>WW GEN2 # 21</b>
2	<b>-5.572</b>	<b>31.556</b>	<b>32.044</b>	<b>5.022</b>	<b>17.39</b>	<b>EQ" CS-4MQ # 3</b>
3	<b>-4.059</b>	<b>10.878</b>	<b>11.611</b>	<b>1.731</b>	<b>34.96</b>	<b>DELT CS-4MQ # 3</b>
4	-0.046	0.097	0.108	0.016	42.45	x 0022 RV_GEN1 # 940
5	-6.475	3.695	7.455	0.588	86.85	EQ' GEN2 # 21
6	-1.847	0.940	2.072	0.150	89.12	x 0009 RV_GEN1 # 940
7	-34.110	14.930	37.234	2.376	91.61	x 0018 RT_GEN1 # 900
8	-1.605	0.433	1.662	0.069	96.55	x 0009 RV_GEN1 # 940
9	-10.089	2.314	10.351	0.368	97.47	EQ" GEN2 # 21
10	-31.324	6.015	31.896	0.957	98.21	x 0086 RT_GEN2 # 901
11	-16.788	3.147	17.081	0.501	98.29	EQ" CS-4MQ # 3
12	-15.248	1.756	15.349	0.280	99.34	x 0009 DMCVMD03 # 1
13	-15.248	1.756	15.349	0.280	99.34	x 0010 DMCVMD03 # 1
14	-7.524	0.837	7.570	0.133	99.39	EQ' CS-4MQ # 3
15	-714.290	0.000	714.290	0.000	100.00	x 0018 DMCVMD03 # 2

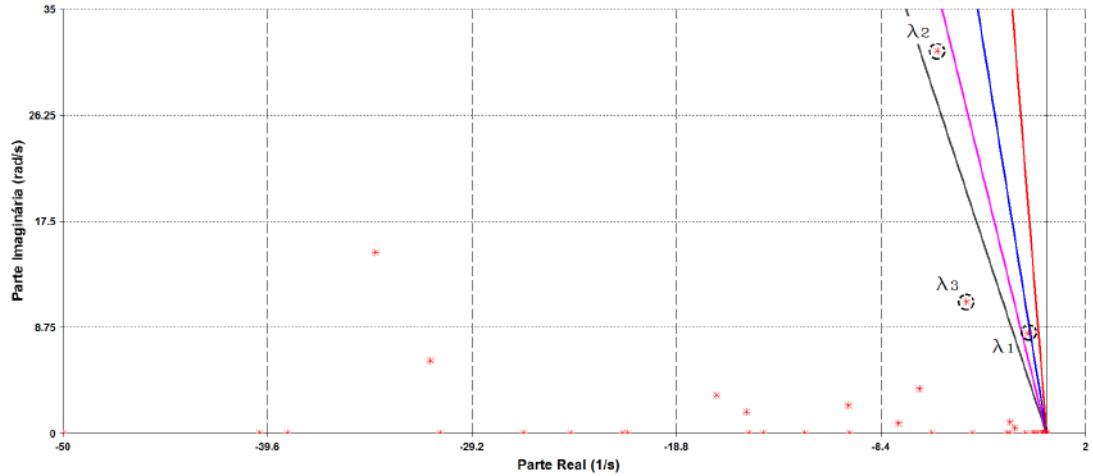


Figura 3.2: Autovalores do sistema base.

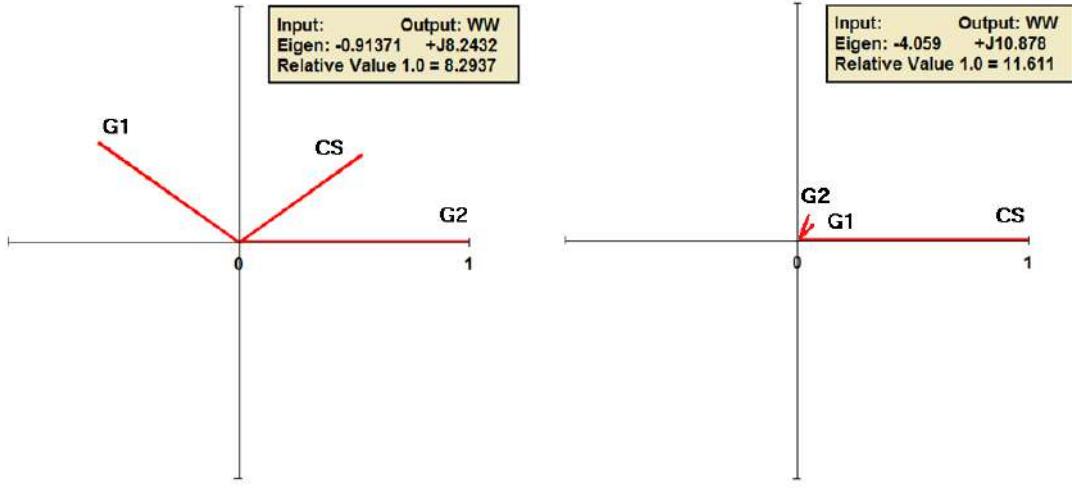
### Modos eletromecânicos

Para o sistema base com três máquinas rotativas, tem-se dois modos de oscilação. Uma vez que da Tabela 3.3, os modos 1 e 3 se ajustam a faixa de frequência correspondente aos modos eletromecânicos, apresentados novamente a seguir.

Tabela 3.4: Modos eletromecânicos do sistema base.

Polo	Real	Imaginário	Módulo	Freq. [Hz]	Amort. (%)
1	-0.914	8.243	8.294	1.312	11.017
3	-4.059	10.878	11.611	1.731	34.959

De maneira a identificar a forma em que oscilam as máquinas para os dois modos eletromecânicos, a Figura 3.3 apresenta os *mode shapes* de velocidade dos dois modos. O *mode shape* da Figura 3.3a indica que o CS e o G2 oscilam coerentemente e em oposição a G1. Oscilações coerentes correspondem a modos que oscilam praticamente da mesma forma ou em fase. Já para o caso do *mode shape* do modo 3, a Figura 3.3b indica que o CS oscila contra o sistema, ou seja, em oposição de fase, correspondendo a um modo local.

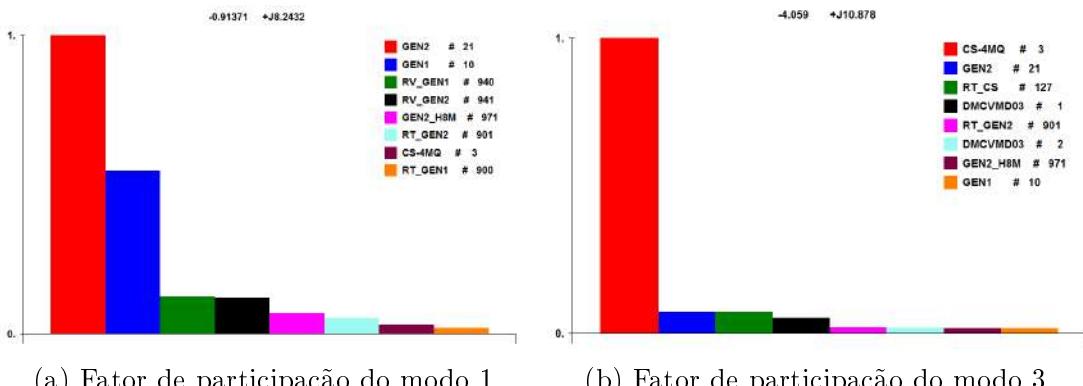


(a) *Mode shapes* do modo 1.

(b) *Mode shapes* do modo 3.

Figura 3.3: *Mode shapes* de velocidade dos modos eletromecânicos.

A Figura 3.4 apresenta os fatores de participação (FP) correspondentes aos dois modos eletromecânicos, que permite determinar quais equipamentos e controladores possuem maior influência sobre estes modos. Da Figura 3.4a, a unidade geradora com maior fator é a G2, seguida por G1 e dos seus respectivos reguladores de velocidade (RV). Para os fatores do modo 3, Figura 3.4b, o compensador síncrono praticamente é quem tem maior influência sobre o modo.



(a) Fator de participação do modo 1.

(b) Fator de participação do modo 3.

Figura 3.4: Fatores de participação dos modos eletromecânicos.

## Pontos de operação

A partir do sistema em seu ponto de operação (PO) definido como base, isto é, o ponto de operação onde cada um dos polos do elo CCAT está transmitindo 1160 MW de potência, totalizando 4640 MW, são criados novos pontos de operação.

Os novos cenários de operação correspondem a pontos com o mesmo patamar de carga e geração, com a única diferença que para cada ponto é aumentado o

valor especificado por polo (VSF) de potência ativa sendo transmitida pelo elo. O aumento de potência em cada polo é de 25 MW, totalizando 100 MW de diferença entre os pontos de operação.

A Tabela 3.5, apresenta os 23 novos pontos de operação, onde também são apresentadas as variações da geração de potência reativa do compensador síncrono conectado a barra inversora, resultado do fluxo de potência.

Tabela 3.5: Os 23 pontos de operação, para o mesmo patamar de carga/geração.

PO	VSF [MW/polo]	CS [Mvar]
1	1040	270.9
2	1060	89.7
3	1085	3.8
4	1110	-36.9
5	1135	-53.4
6	1160	-53.3
7	1185	-40.5
8	1210	-17.2
9	1235	15.3
10	1260	56.1
11	1285	104.6
12	1310	160.8
13	1335	104.6
14	1360	160.8
15	1385	373.9
16	1410	460.4
17	1435	555.4
18	1460	659.5
19	1485	773.5
20	1510	898.8
21	1535	1037
22	1560	1190.4
23	1570	1272.1

Calculando-se os autovalores associados aos 23 novos cenários, com a variação da potência transmitida pelo elo CCAT, constata-se a existência de um modo de oscilação que atravessa o eixo imaginário instabilizando o sistema, conforme Figura 3.5. Neste trabalho é denominado modo crítico, conforme referência [6].

O traçado do lugar das raízes (*root-locus*) da teoria de controle corresponde a um gráfico pelo qual é determinado a maneira como as raízes (modos) do sistema variam com a variação de um parâmetro, usando geralmente um ganho dentro de um sistema em malha fechada. Porém, neste trabalho, além da variação de parâmetro, também é empregado a variação da potência ativa transmitida no elo CCAT.

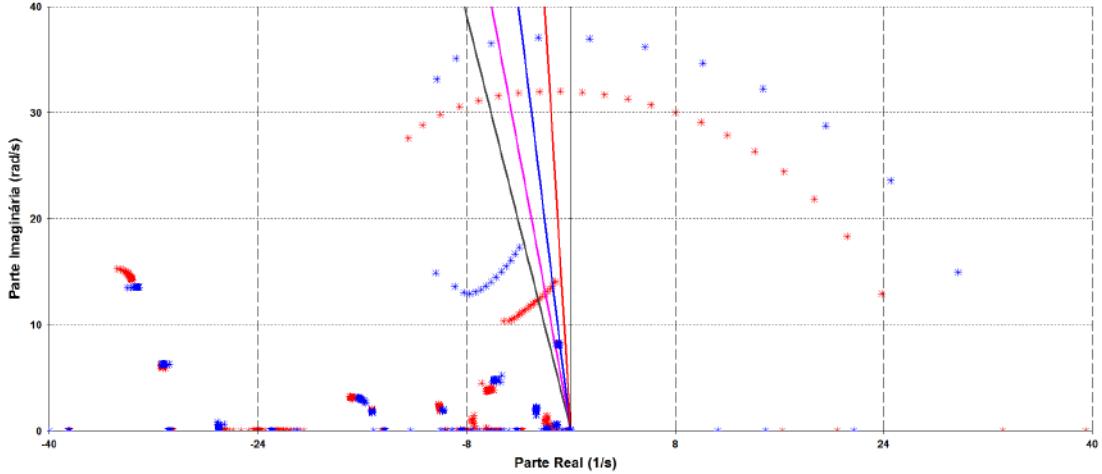


Figura 3.5: Lugar das raízes do sistema base para a variação do ponto de operação com 4 CS (vermelho) e com 1 CS (azul).

### Modo crítico

A Figura 3.5 apresenta o lugar das raízes do sistema base para a variação do ponto de operação, com 4 compensadores síncronos e com apenas um. Observa-se que o aumento da potência transmitida pelos bipolos instabiliza o sistema, fazendo com que o autovalor crítico passe ao semiplano direito. Para o sistema com a quantidade de máquinas predeterminado o modo crítico passa ao semiplano direito (SPD) entre os pontos de operação 9 e 10, da Tabela 3.5.

Para o ponto de operação 9, o denominado modo crítico é caracterizado por  $\lambda = -0.797 \pm j32.01$ , frequência de oscilação de 5.095 Hz e amortecimento de 2.49 %. Observa-se que a variação de potência do elo CCAT afeta não apenas o posicionamento do modo no que diz respeito a seu amortecimento, como também apresenta uma variação na sua frequência de oscilação.

De maneira a determinar a natureza do modo, a Figura 3.6 apresenta os fatores de participação do modo crítico para o ponto de operação número 9. O autovalor crítico possui os seguintes fatores: o primeiro com a variável *EQ*" (tensão subtransitória de eixo quadratura) do compensador síncrono, os quatro seguintes com a variável *x0017* do *DMCVMD03 # 1* (*DMCV* modelo do conversor do tipo MD03 (modelo número 3), conforme especificação no manual do ANATEM [30]) e os quatro últimos com a variável *x0303* do *DMCVMD03 # 2*. Verifica-se que o modo crítico, para o PO 9, tem o compensador síncrono como seu maior fator de participação, seguido do modelo de controle dos conversores. Porém, a determinação da origem deste modo não é possível devido as variáveis relacionadas aos fatores supracitados. No entanto, pode-se argumentar que estes parâmetros o determinam como um modo proveniente do equacionamento do sistema elétrico ou do sistema de controle. Este resultado

motivou a realização da análise de sensibilidade do modo crítico, seção 3.1.3.

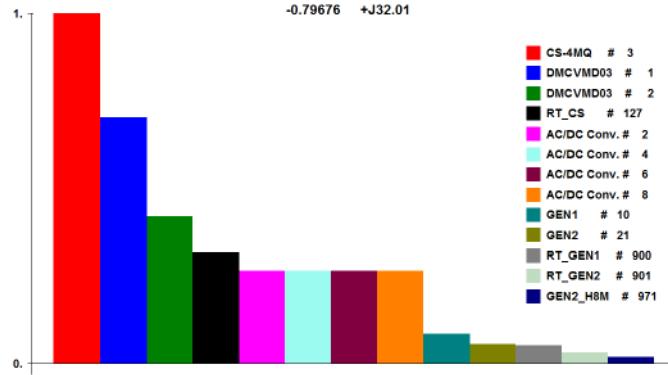


Figura 3.6: Fatores de participação do autovalor crítico para o PO 9.

A Figura 3.7 apresenta o posicionamento dos autovalores para as outras alternativas de LT interconexão cogitadas na Tabela 3.1. Além disso, é apresentado o posicionamento para a LT interconexão como um barramento.

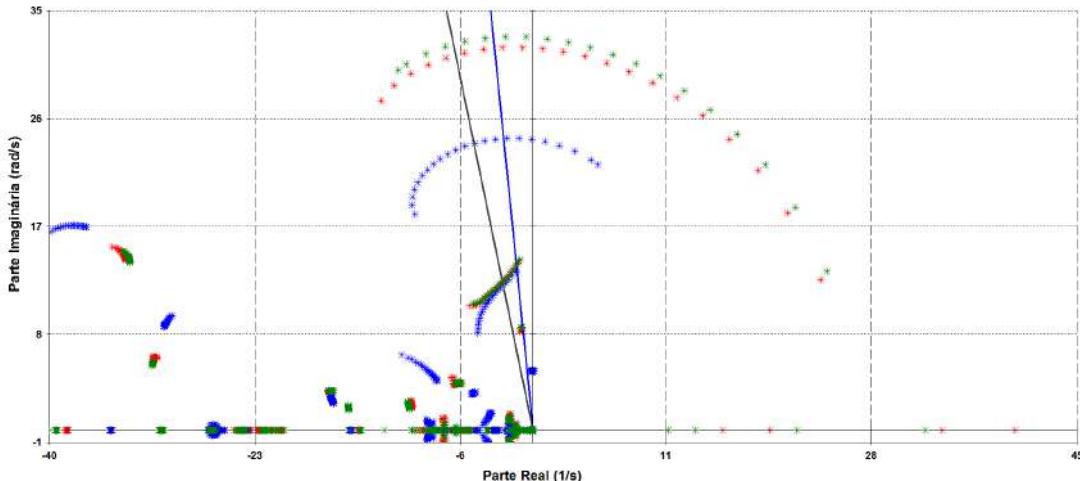


Figura 3.7: Lugar das raízes para o sistema base com LT interconexão 1 (vermelho), com LT interconexão 2 (azul) e barramento (verde).

Percebe-se que o modo crítico tanto para a LT interconexão 1, LT interconexão 2 e o barramento cruza o eixo imaginário em diferentes pontos de operação. Para o caso da LT interconexão 1, o modo crítico cruza entre os pontos de operação 9 e 10, da Tabela 3.6, para o caso da LT interconexão 2 e do barramento, o modo crítico cruza entre os PO 18 e 19, da Tabela 3.7. O motivo do aumento da margem de estabilidade será abordado na seção 3.1.4. No caso destas duas últimas opções, têm-se que o autovalor crítico cruza o eixo imaginário concomitantemente com um autovalor eletromecânico entre os mesmos pontos de operação, o que a princípio

dificultaria a percepção e análise do autovalor crítico na resposta do sistema sob qualquer perturbação. Por conseguinte, a LT interconexão 1 é utilizada como a base para as simulações subsequentes.

Tabela 3.6: PO 9 e 10 para o sistema com a LT interconexão 1.

Ponto de operação 9					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	-0.797	32.010	5.095	2.49	EQ" CS-4MQ #3
3	-0.912	8.243	1.312	11.00	WW GEN2 #21
5	-3.597	11.322	1.802	30.28	WW CS-4MQ #3
7	-0.044	0.098	0.016	41.15	RV_GEN1 #940
9	-6.421	3.730	0.594	86.47	EQ' GEN2 #21
11	-1.851	0.937	0.149	89.23	RV_GEN1 #940

Ponto de operação 10					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	0.874	31.905	5.078	-2.74	EQ" CS-4MQ #3
3	-0.911	8.244	1.312	10.98	WW GEN2 #21
5	-3.440	11.473	1.826	28.72	WW CS-4MQ #3
7	-0.044	0.098	0.016	40.70	RV_GEN1 #940
9	-6.401	3.747	0.596	86.30	EQ' GEN2 #21
11	-1.857	0.937	0.149	89.28	RV_GEN1 #940

Tabela 3.7: PO 18 e 19 para o sistema com a LT interconexão 2.

Ponto de operação 18					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	-0.009	4.954	0.789	0.17	WW GEN1 #10
3	-0.044	24.418	3.886	0.18	EQ" CS-4MQ #3
5	-2.488	12.090	1.924	20.16	WW CS-4MQ #3
7	-0.028	0.083	0.013	32.38	GEN2_H8M #971
9	-5.048	3.053	0.486	85.57	EQ' GEN1 #10
11	-8.087	4.302	0.685	88.29	EQ' GEN2 #21

Ponto de operação 19					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	1.074	24.227	3.856	-4.43	EQ" CS-4MQ #3
3	0.012	4.944	0.787	-0.25	WW GEN1 #10
5	-2.258	12.320	1.961	18.03	DELT CS-4MQ #3
7	-0.027	0.082	0.013	31.56	GEN2_H8M #971
9	-5.064	3.051	0.486	85.66	EQ' GEN1 #10
11	-8.020	4.229	0.673	88.46	EQ' GEN2 #21

### 3.1.2 Desempenho dinâmico do sistema

As análises do desempenho dinâmico contempladas neste trabalho correspondem a dois tipos de contingências, sendo a primeira a um degrau na ordem de referência do elo CCAT e a segunda uma falha monofásica pouco severa, em conformidade com [6] e [4], respectivamente. O degrau na ordem de referência do elo CCAT pode ser na ordem de corrente ou de potência em função do tipo de controle ajustado nos bipolos durante a simulação. Quando não mencionado no texto, pode-se admitir o elo em controle de potência e, portanto, a simulação corresponde a um degrau na ordem de potência. A segunda perturbação corresponde a uma falta aplicada diretamente na barra CA do retificador, ou seja, barra B1, com uma duração total de 100 ms. Esta perturbação representa uma aproximação de um curto circuito monofásico, através da modificação do *shunt* da barra, e é empregado visando a não atuação das malhas auxiliares dos controles dos bipolos. O passo de integração para todas as simulações no domínio do tempo é de 1 milissegundo.

A redução do amortecimento do sistema por causa do autovalor crítico em direção ao semiplano direito é analisada a partir das duas sensibilidades descritas anteriormente, realizando simulações lineares e não-lineares no domínio do tempo considerando diferentes pontos de operação. Os pontos escolhidos, conforme Tabela 3.5, são o PO 6, o PO 9 e PO 10, uma vez que estes representam o detimento da margem de estabilidade do sistema, devido ao modo crítico com amortecimento de 17.4 %, 2.48 % e -2.73 %, respectivamente.

Em  $t = 100$  ms, é aplicado um degrau de 1 % no valor de referência para a ordem de potência nos dois bipolos do sistema. A Figura 3.8 apresenta a respostas lineares e não-lineares do sistema para os pontos de operação escolhidos. O gráfico é do desvio de potência ativa em relação ao seu valor inicial em  $t = 0$  segundos, opção útil para comparação de resultados entre programas de análise de pequenas perturbações e transitórios eletromecânicos.

Observa-se que com a diminuição do amortecimento do modo crítico, a resposta linear apresenta um aumento do efeito oscilatório entre os pontos de operação 6 e 9, Figura 3.8a e 3.8c, caracterizando desta maneira o detimento da margem de estabilidade do sistema, e para o caso do PO 10 apresenta uma instabilidade do tipo periódica com oscilações crescentes no tempo, Figura 3.8e, característico de autovalores complexos com parte real positiva. Já nos casos das simulações não-lineares tais oscilações não são observadas, Figuras 3.8b, 3.8d e 3.8f. Este fato deve-se a atuação das malhas de controle auxiliares do elo CCAT, que não estão representadas na modelagem a pequenas perturbações por apresentarem características do tipo não-linear.

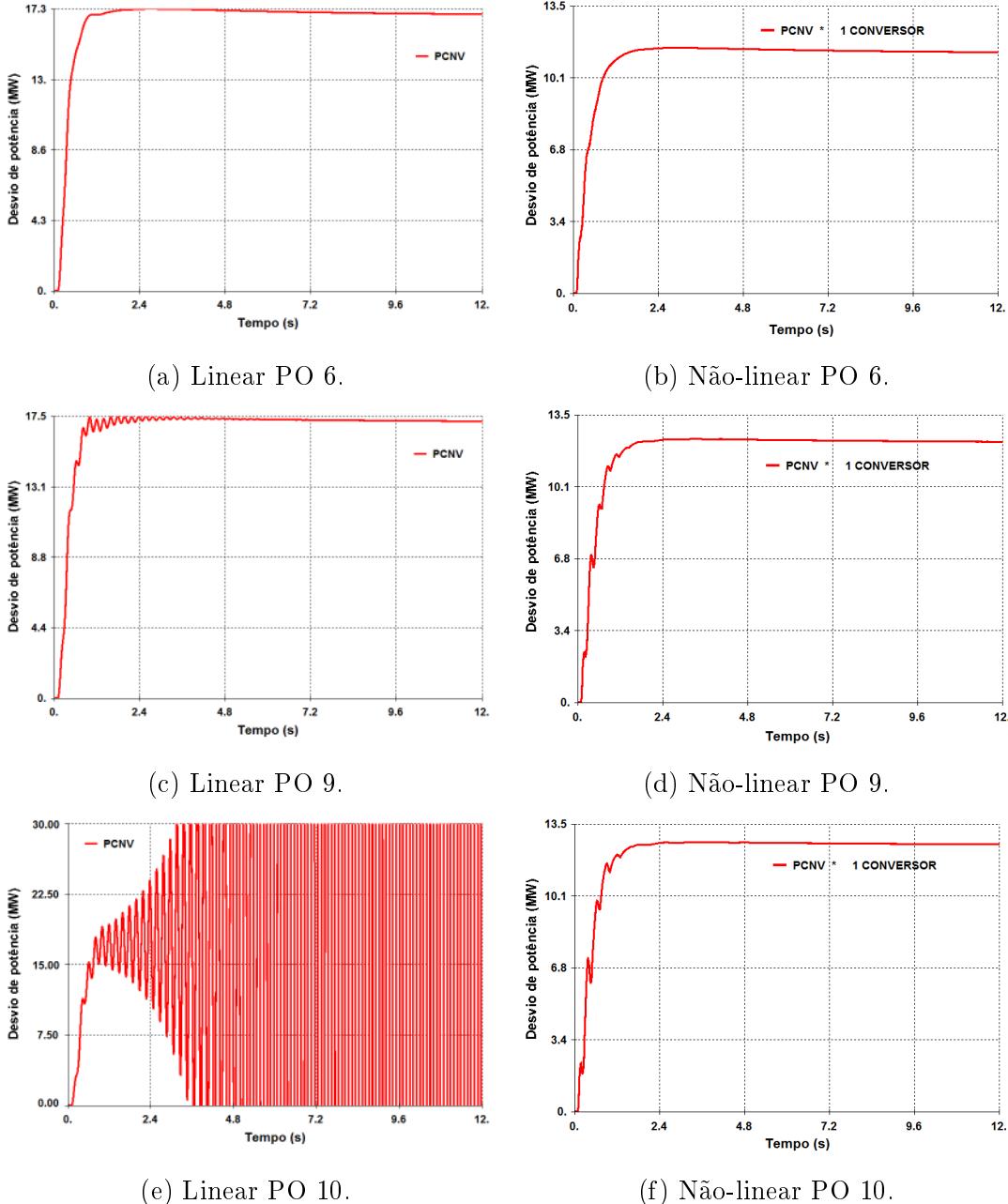
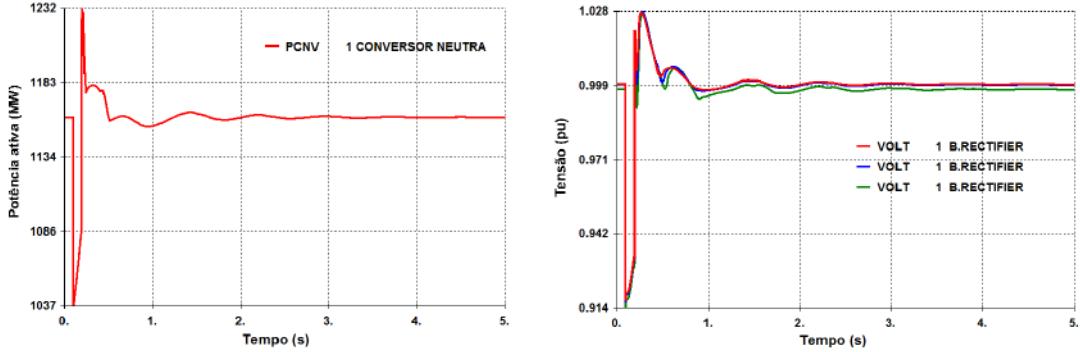


Figura 3.8: Desvio de potência ativa para degrau de 1% na ordem de potência nos pontos de operação 6, 9 e 10.

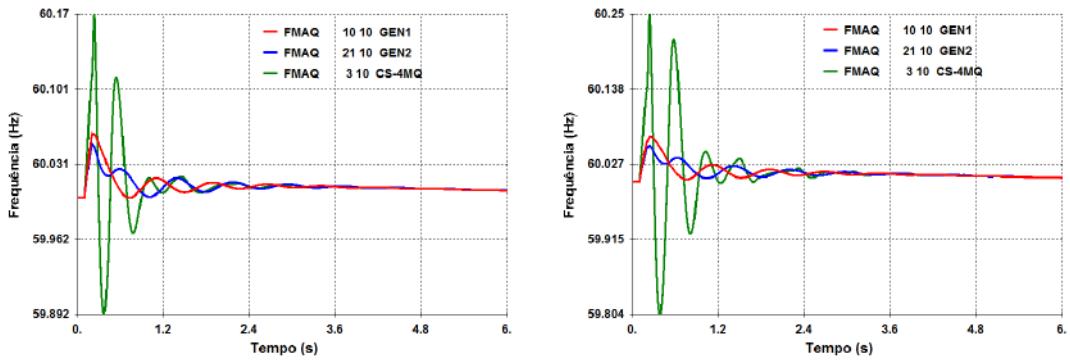
Para a segunda perturbação somente são apresentadas respostas dinâmicas não-lineares no domínio do tempo, já que a oscilação relacionada ao modo crítico está ausente neste tipo de simulação.



(a) Potência ativa para PO 6.

(b) Tensão CA para PO 6, 9 e 10.

Figura 3.9: Potência ativa e tensões CA da barra retificadora para falta monofásica.



(a) Frequência das máquinas para PO 6.

(b) Frequência das máquinas para PO 10.

Figura 3.10: Frequência das máquinas para falta monofásica nos pontos de operação.

A Figura 3.9 apresenta a potência ativa de um dos polos dos bipolos no PO 6 e as tensões CA da barra retificadora (B1) para os três pontos de operação (PO 6 em vermelho, PO 9 em azul e PO 10 em verde). A redução da tensão da barra CA, reduz a tensão CC o que leva a uma diminuição da potência transmitida durante a falta. As Figuras 3.10a e 3.10b apresentam as frequências das máquinas G1, G2 e CS para os pontos de operação 6 e 10, respectivamente. Observe o aumento das amplitudes das frequências das máquinas, evidenciando a mudança entre os pontos de operação .

As respostas dinâmicas não-lineares do sistema após a aplicação dos distúrbios, mesmo para o PO 10 onde o modo crítico posiciona-se no semiplano direito, não apresentam as oscilações esperadas e observadas nas simulações lineares no domínio do tempo. Neste sentido, para uma melhor compreensão dos fatores envolvidos nas respostas não-lineares, uma investigação mais aprofundada da origem deste autoválor crítico é apresentado a seguir.

### 3.1.3 Análise de sensibilidade do modo crítico

Nesta seção, continuando as interpretações da seção 3.1.1 e 3.1.2, apresenta-se uma análise da sensibilidade do modo crítico a diversos parâmetros do sistema do ponto de vista da estabilidade a pequenos sinais, utilizando ferramentas desta teoria de maneira a entender a natureza e origem do modo.

É tomado como base o ponto de operação PO 9, com o VSF de 1235 MW/polo e o autovalor crítico em  $-0.7968+j32.01$ , frequência de oscilação de 5.09 Hz e amortecimento de 2.48 %. Variáveis dos controles, aumento do carregamento, variação de parâmetros de linha, ausência de dinâmica de máquinas e inserção de uma barra infinita são empregados para a interpretação do modo.

#### Modificação de ganho

Para o ponto de operação dado, o autovalor crítico tem como maior fator de participação o compensador síncrono, conforme Figura 3.6. Por conseguinte, a primeira análise é para a variação das variáveis associadas a esta máquina.

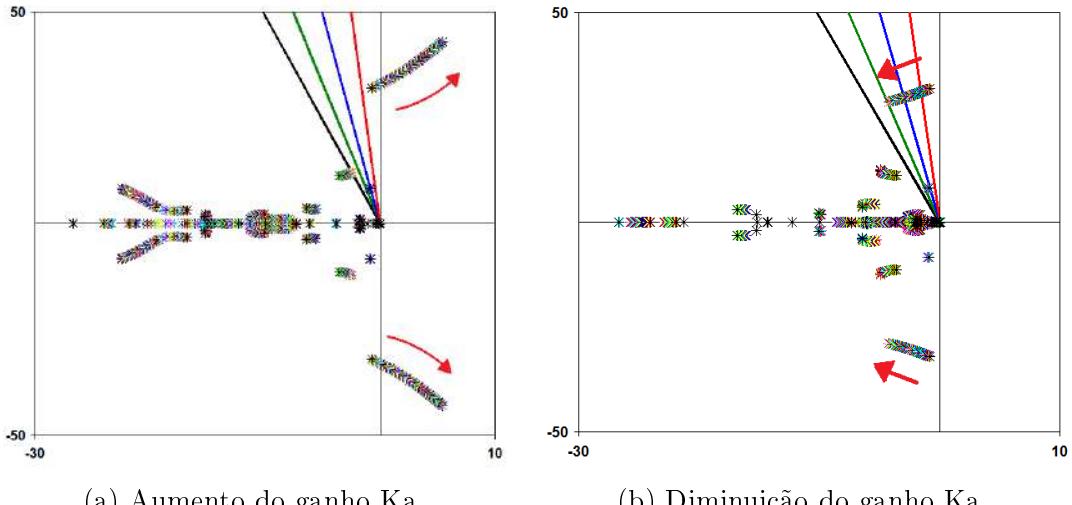


Figura 3.11: Lugar das raízes para a modificação do ganho Ka do regulador de tensão do compensador síncrono.

A Figura 3.11a apresenta o *root-locus* para o modo crítico com o aumento do ganho Ka do regulador de tensão (RAT) do compensador síncrono a partir do ponto de operação PO 9. O ajuste predeterminado deste ganho é de 100 pu. Observa-se que o aumento do valor do ganho instabiliza o sistema, devido ao modo crítico. A Figura 3.11b apresenta o *root-locus* considerando a diminuição do ganho Ka do regulador de tensão do compensador síncrono. Portanto, a maneira de aumentar o amortecimento do modo, seria reduzir o valor do ganho do regulador, porém está

ação resultaria em ações mais lentas da regulação de tensão, podendo levar a um desempenho dinâmico insatisfatório.

O segundo fator de participação depois do compensador síncrono é o elo CCAT, tendo como principal malha de controle o CCA, responsável pela regulação de corrente em um valor determinado. Tanto o conversor trabalhando como retificador ou como inversor possuem esta malha, porém, em regime, o CCA do inversor fica saturado fazendo com que o controle da corrente da linha seja executado pelo CCA do retificador. Tratando-se de um regulador PI, com ganho proporcional ( $K_p$ ) e ganho integral ( $K_i$ ), a variação dos seus respectivos valores em função do aumento ou diminuição deste para os valores predeterminados da Tabela 3.8 são apresentados a seguir.

Tabela 3.8: Parâmetros do controle CCA do retificador.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
$K_p$	Ganho proporcional do CCA	102	pu
$K_i$	Ganho integral do CCA	2500	pu

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam o *root-locus* para a variação dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$ , respectivamente. Uma vez que o modo crítico apresenta uma tendência ao semiplano esquerdo (SPE) para o aumento tanto do ganho  $K_p$  quanto do ganho  $K_i$ , através de tentativas e erros de ajustes para obter um melhor posicionamento do modo crítico no PO 9, foram escolhidas a associação de  $K_p = 170$  pu e  $K_i = 4100$  pu.

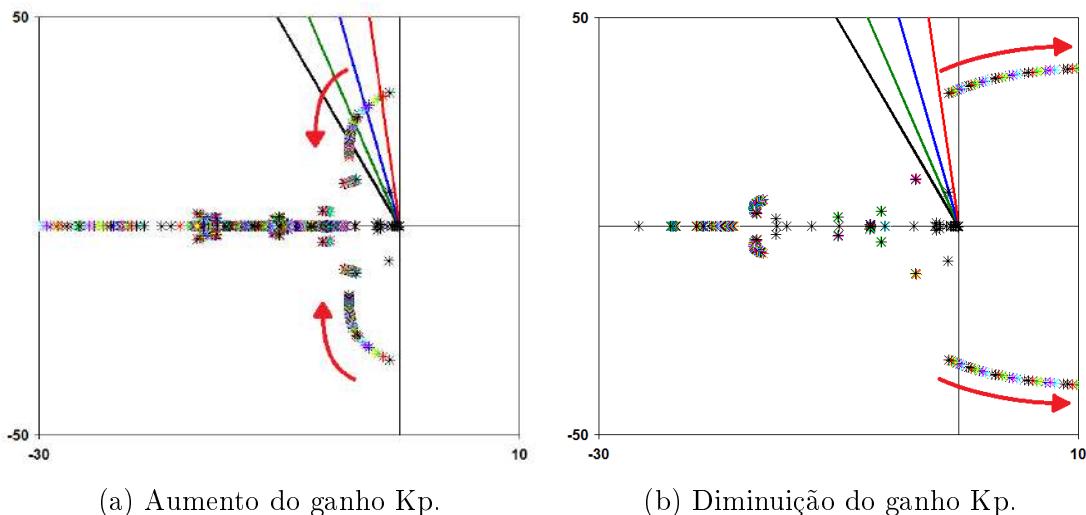


Figura 3.12: Lugar das raízes para a variação do ganho proporcional ( $K_p$ ) dos controles CCA dos retificadores do elo CCAT.

Com a nova associação de ganhos, o modo crítico apresenta um aumento considerável do seu amortecimento para o mesmo ponto de operação (PO 9), conforme

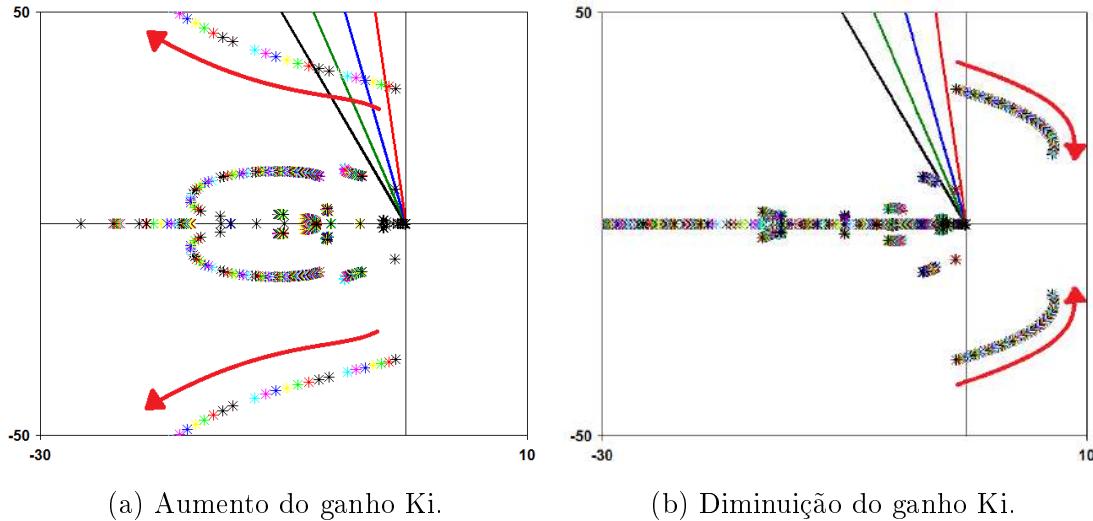


Figura 3.13: Lugar das raízes para a variação do ganho integral ( $Ki$ ) dos controles CCA dos retificadores do elo CCAT.

apresentado na Tabela 3.9. A modificação dos dois parâmetros do CCA do retificador apresentaria-se como uma solução ao problema, porém o novo ajuste não evita o cruzamento ao SPD do modo crítico, como demostrado a seguir. A Figura 3.14 apresenta a comparação do lugar das raízes do sistema com o novo ajuste e com os valores predeterminados para o aumento da potência ativa.

Tabela 3.9: Dados do modo crítico para variação dos ganhos do CCA do retificador.

Ganho	Autovalor	Freq.[Hz]	Módulo	Amort. [%]
Predeterminado	-0.7968+j32.010	5.095	32.02	2.49
Novo KP e KI	-9.4863+j23.106	3.678	24.98	37.98

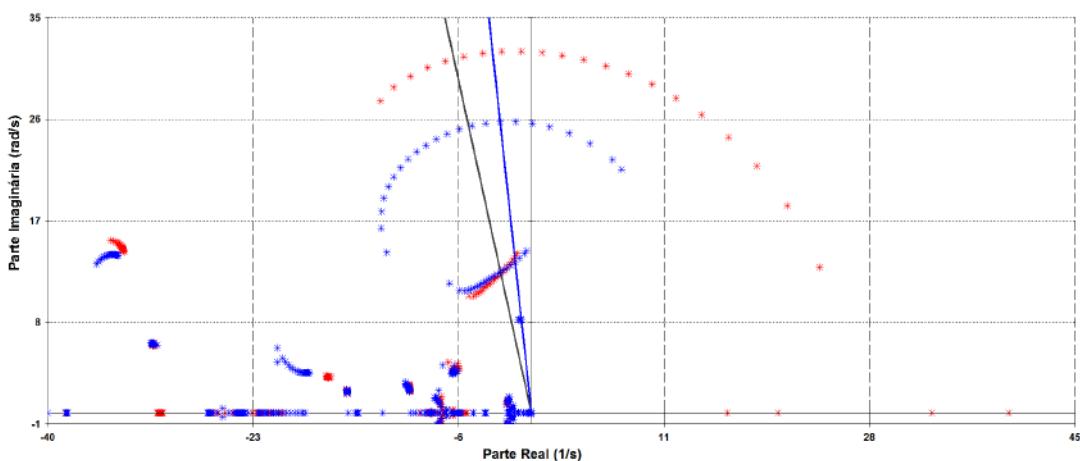


Figura 3.14: Lugar das raízes do sistema para os valores predeterminados (vermelho) e para os novos valores de  $Kp$  e  $Ki$  do CCA (azul).

Para a nova associação de valores é apresentada a seguir a simulação da resposta dinâmica do sistema, utilizando a segunda perturbação e comparando a resposta dos novos valores com os predeterminados para o mesmo ponto de operação. A Figura 3.15 apresenta a potência ativa de um dos polos do elo CCAT. No instante da retirada da falha, em  $t = 200$  ms, é possível ver que a nova associação dos ganhos permitiu um menor *overshoot*, em consequência, a potência permanece com um maior valor durante os instantes posteriores. A diminuição é em função de uma atuação mais rápida por parte do controlador CCA do retificador.

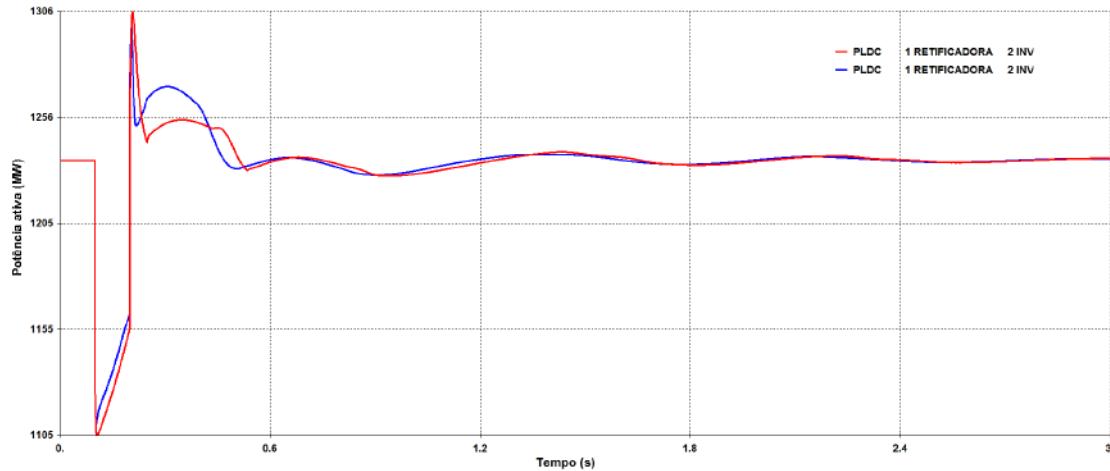


Figura 3.15: Potência ativa para PO 9 para os valores predeterminados (vermelho) e para os novos valores de  $K_p$  e  $K_i$  (azul).

### Aumento de carga

A seguir verifica-se a influência do carregamento no sistema, são escolhidos as barras B36, B37, B38 e B2 (inversora). A escolha é realizada em função da proximidade destes barramentos com a inversora. Os pontos de operação são criados a partir do caso base com um aumento progressivo de 5 MW nos 4 barramentos ao mesmo tempo, conforme Tabela 3.10, mantendo a geração e a potência transmitida pelo elo constantes.

Tabela 3.10: Variação do carregamento nos 4 barramentos [MW].

Caso	base	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B36	1940	1945	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
B37	2931	2936	2941	2946	2951	2956	2961	2966	2971	2976	2981	2986	2991	2996	3001
B38	1498	1503	1508	1513	1518	1523	1528	1533	1538	1543	1548	1553	1558	1563	1568
B2	3652	3657	3662	3667	3672	3677	3682	3687	3692	3697	3702	3707	3712	3717	3722

A Figura 3.16 apresenta a variação do posicionamento dos polos, observa-se que o autovalor crítico tende ao semiplano esquerdo, ou seja, aumenta o seu amortecimento com o aumento do carregamento. Este fato será abordado na seção 3.1.4.

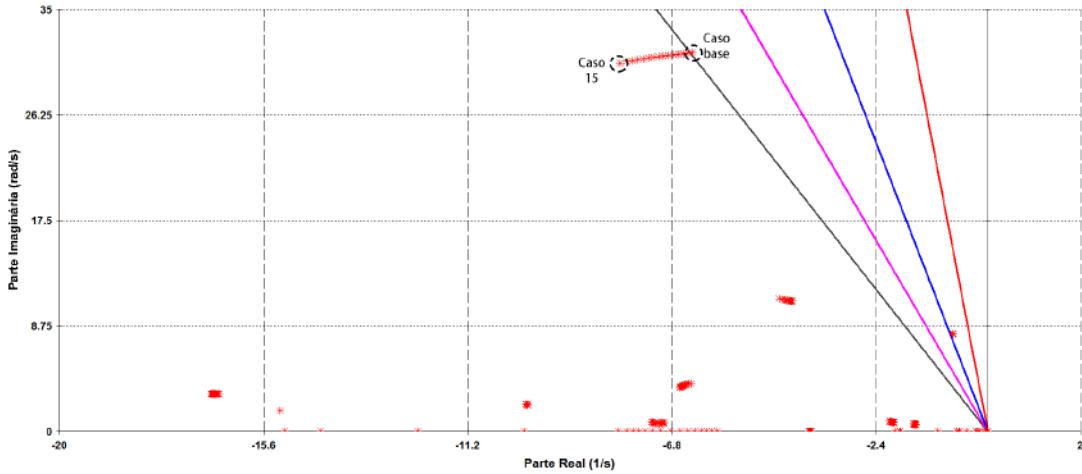


Figura 3.16: Lugar das raízes do sistema para o aumento do carregamento do sistema.

### Varição dos parâmetros da LT interconexão

Empregando dados de linhas de transmissão do SIN, os parâmetros R, X e B da LT interconexão são modificados para observar a influência sobre o modo crítico do sistema, utilizando o PO 6 como base. A Tabela 3.11 apresenta a seleção das 41 linhas de transmissão distintas.

Tabela 3.11: Seleção de linhas a partir da base de dados da ONS.

Caso	R[%]	X [%]	B [Mvar]	Caso	R[%]	X [%]	B [Mvar]
BASE	0.0049	0.1023	10.53	22	64.190	164.100	0.15
2	0.098	0.666	2.47	23	37.150	37.930	0.51
3	0.026	0.231	7.64	24	0.795	3.798	7.03
4	0.560	2.770	0.67	25	79.340	192.950	0.20
5	0.020	0.250	10.77	26	4.959	12.060	3.22
6	0.540	3.060	0.87	27	0.464	3.543	11.79
7	2.620	5.930	0.57	28	1.290	7.630	14.24
8	0.010	0.193	19.12	29	75.370	76.950	1.04
9	1.691	4.441	1.14	30	7.960	19.820	5.25
10	0.014	0.189	28.58	31	1.920	9.630	17.27
11	0.030	0.340	19.21	32	9.989	24.293	6.49
12	0.840	4.790	1.36	33	159.820	388.690	0.41
13	0.385	2.152	3.97	34	43.154	142.070	2.68
14	15.080	21.620	0.33	35	2.810	15.080	26.08
15	1.890	5.660	1.47	36	0.156	2.262	181.15
16	74.300	99.500	0.10	37	0.650	7.320	118.01
17	17.330	26.900	0.39	38	21.690	57.820	14.06
18	1.890	6.190	1.93	39	4.887	23.080	45.98
19	8.212	19.341	0.85	40	0.170	2.820	390.00
20	89.200	119.400	0.12	41	2.305	16.890	89.93
21	0.335	2.742	6.51	42	0.072	1.750	877.50

A Figura 3.17 apresenta a variação do modo crítico para a variação dos três parâmetros da LT interconexão. O aumento dos valores dos parâmetros faz com que o modo crítico aumente o seu amortecimento tornando o sistema mais estável. Este fato será abordado na seção 3.1.4. No entanto, deve ser observado que um dos modos eletromecânicos (o modo 1) do sistema torna-se instável.

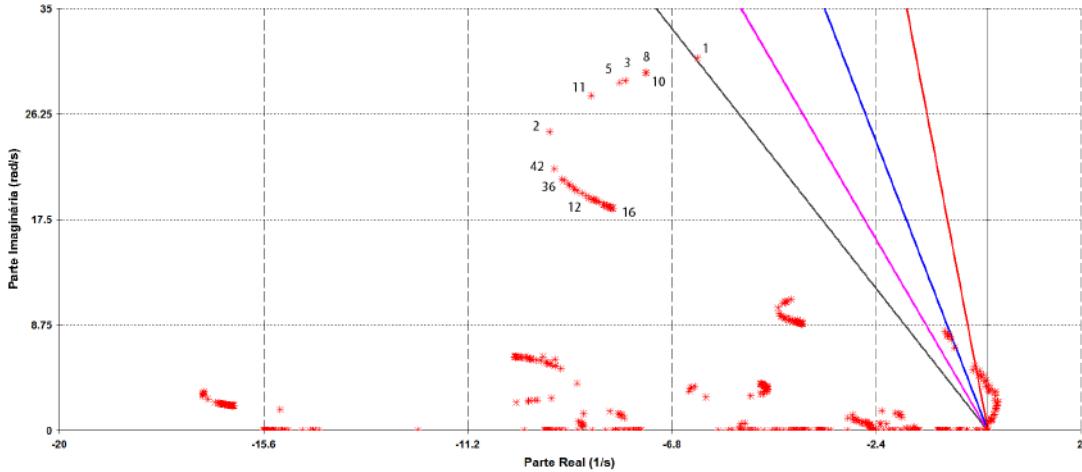


Figura 3.17: Lugar das raízes do sistema para a variação dos três parâmetros da LT interconexão a partir do PO 6.

### Ausência de dinâmica

Em programas de estabilidade eletromecânica, a ausência da representação dinâmica das máquinas é contornada representando-as como uma impedância constante [30]. A remoção de elo CC, em programas de fluxo de potência, é realizada com o objetivo de criar injeções de potência iguais aos valores de potência injetados pelo elo CCAT, eliminando assim todo o sistema de transmissão CCAT e conservando o ponto de operação do sistema [33].

Neste contexto, são examinadas as sensibilidades dos modos do sistema na variação dos pontos de operação, conforme Tabela 3.5, para a ausência de dinâmica das máquinas, geradores síncronos (G1, G2) e o compensador síncrono (CS), assim como para a ausência do elo CCAT.

A Figura 3.18 apresenta a variação dos modos do sistema para a ausência de dinâmica das máquinas ou do elo CCAT. Observa-se que a ausência de dinâmica de qualquer uma das máquinas reduz o amortecimento do sistema e, no caso específico do CS, o sistema é instável para qualquer ponto de operação, conforme Figuras 3.18a, 3.18b e 3.18c. Explicações pertinentes a estes fatos serão abordados na seção 3.1.4. Cabe ressaltar que, para a ausência do CS, o autovalor eletromecânico referido como modo 3, conforme Tabela 3.4, desaparece do plano complexo.

A Figura 3.18d apresenta os modos para a ausência dos dois bipolos com suas respectivas injeções equivalentes. Observa-se que, a ausência dos bipolos do elo CCAT faz com que o sistema se apresente estável para qualquer ponto de operação analisado, com o desaparecimento modo crítico. A Figura 3.18e apresenta os modos para a ausência de somente um dos bipolos com sua respectiva injeção, o outro bipolar

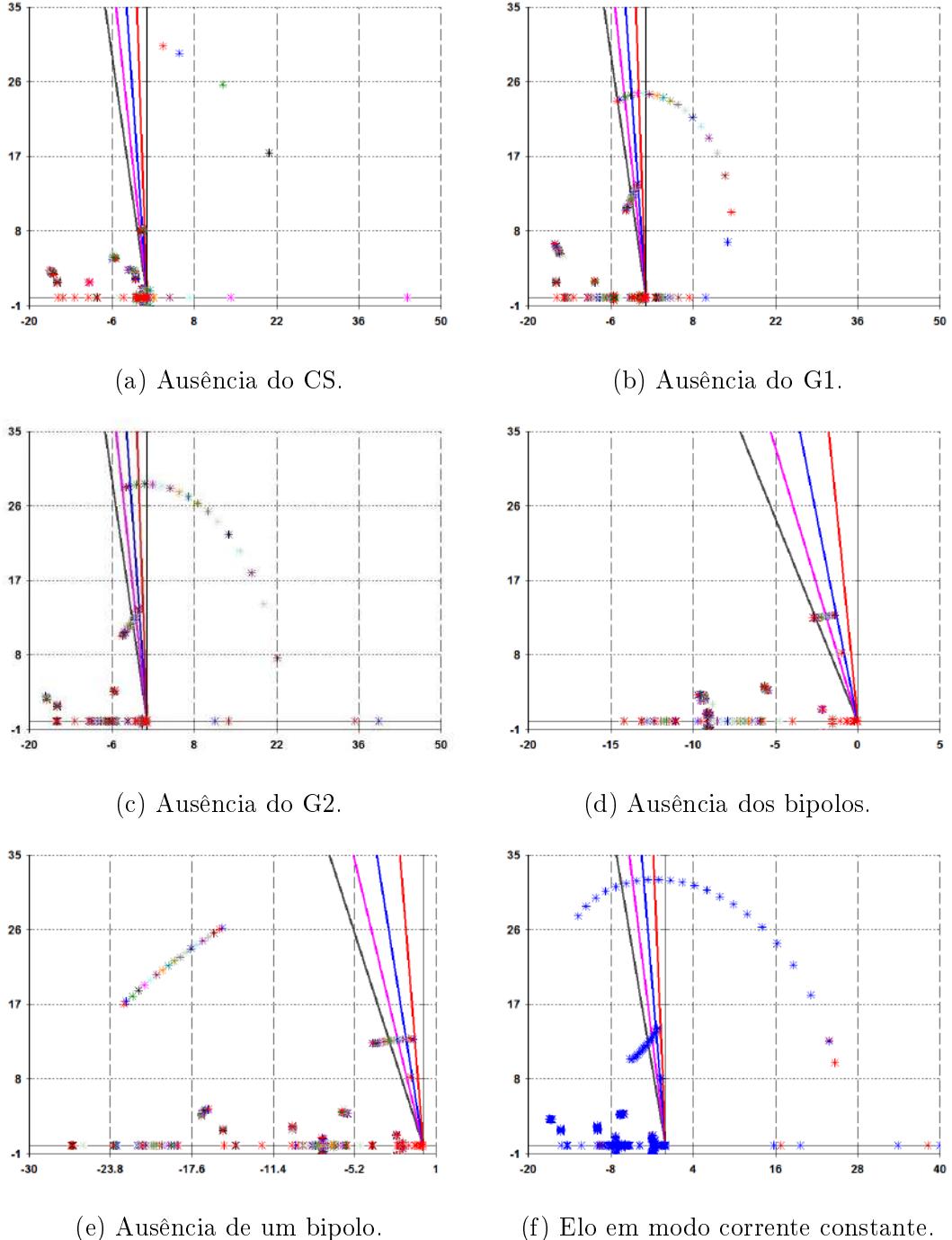


Figura 3.18: Lugar das raízes para a ausência da dinâmica das máquinas ou do elo CCAT.

é representado normalmente. O modo crítico está presente novamente, porém com maior amortecimento do que apresenta com o sistema completamente representado.

A Figura 3.18f apresenta os autovalores do sistema para os dois modos de controle do elo CCAT, potência constante (vermelho) e corrente constante (azul). Observa-se que, mesmo com a redução da quantidade de malhas de controle quando empregado o modo de controle de corrente constante, o autovalor crítico não desaparece ou é influenciado.

### **Inserção de uma barra infinita**

O sistema base é modificado admitindo barras infinitas em diferentes pontos do sistema, através de uma linha de transmissão ou diretamente a uma determinada barra. A reatância adotada entre a barra escolhida e a barra infinita é de 0.761%, conforme Tabela 3.15. As barras escolhidas, pela proximidade a inversora, são a B36, B37 e B2 (barra inversora) conforme apresentado na Figura 3.1.

A Figura 3.19 apresenta a sensibilidade dos modos do sistema para a inserção da barra infinita nos barramentos B36, B37 e B2.

Infere-se que, o posicionamento do modo crítico é sensível a dois aspectos: o primeiro, a linha de transmissão entre o barramento escolhido e a barra infinita; e o segundo, ao ponto de inserção da barra infinita. Quando não é empregado a linha, Figuras 3.19b, 3.19d e 3.19f, o modo crítico se apresenta com maior amortecimento. Assim também, a maior proximidade da barra infinita a barra inversora, maior será o amortecimento do modo crítico.

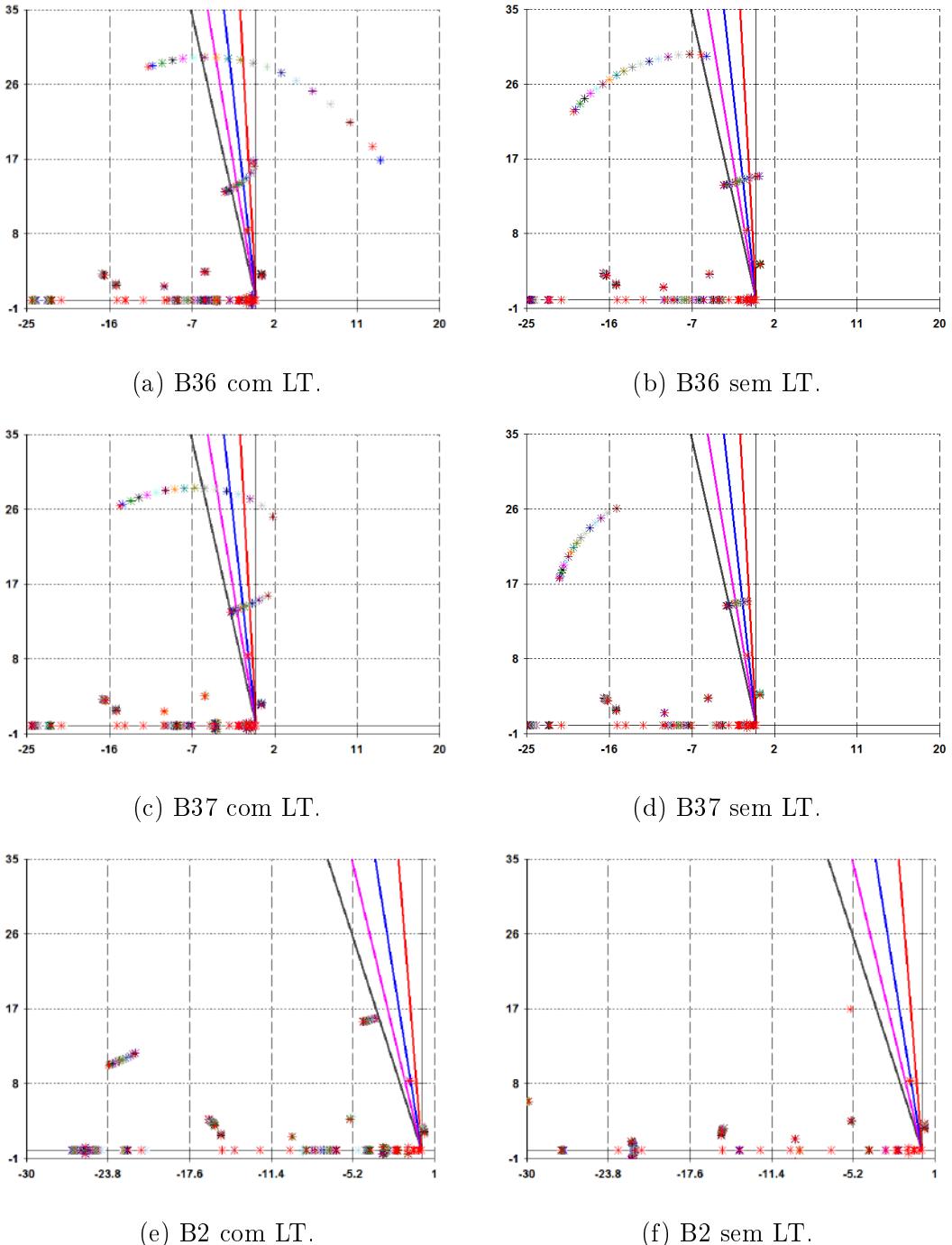


Figura 3.19: Lugar das raízes do sistema base com a inserção de barras infinitas.

### 3.1.4 Influência da relação de curto-circuito - SCR

A comparação das análises de sensibilidade do modo crítico da seção anterior, tanto para o caso da ausência de dinâmica quanto para a inserção da barra infinita no sistema, e em menor grau para a variação da LT interconexão, evidenciam que o modo é influenciado pela potência CA disponível nas barras de interface da retificadora

e da inversora, assim como, pela inercia do sistema. A potência CA destas barras podem ser relacionadas ao elo CCAT através da relação de curto-circuito.

Será agora analisada a influênci da relação de curto-circuito nas barras de interface da retificadora e inversora do sistema.

### Efeito na barra de interface da inversora

Os primeiros dois casos, especificamente para a ausência do compensador síncrono, Figura 3.18a, e para a aproximação da barra infinita a barra inversora, Figura 3.19, exemplificam claramente a influênci da relação de curto-circuito na barra de interface da inversora. Esta também pode ser observada para variação dos modos do sistema com a variação dos pontos de operação para o caso com 4 compensadores síncronos e com um CS, Figura 3.5, assim como, para o aumento de carga do sistema, Figura 3.16.

A ausência de dinâmica leva a uma diminuição do SCR no sistema, e no caso específico do autovalor em análise, a ausência da representação do compensador síncrono teve maior influênci no seu amortecimento, dado que a mesma representa uma maior variação da potência de curto-circuito na barra inversora que nos casos da ausência de G1 e G2. Esta mesma ideia pode ser utilizada para interpretar a variação no posicionamento do autovalor com o ponto de operação e a quantidade de compensadores síncronos. Um maior número de compensadores síncronos na barra inversora representa um maior SCR e, portanto, uma maior potência CA disponível nessa barra.

Do ponto de vista da análise de curto-circuito, uma barra infinita corresponde a uma potência de curto-circuito infinita, portanto, em um SCR infinito. Logo, quanto mais próximo esta estiver da inversora maior será o SCR da barra de interface.

A operação de um elo CCAT terminando em um ponto com alta impedância do sistema CA, isto é, baixo valor de capacidade de curto circuito, pode ser melhorado com a introdução de CS próximo a barra de interface do conversor trabalhando como inversor.

O aumento de carga do sistema condiz também com esta influênci. O aumento das cargas do tipo potência constante do fluxo de potência, é percebida pelos demais programas como uma diminuição das impedâncias correspondentes a estas, que por sua vez, faz com que o circuito equivalente do ponto de vista da barra inversora diminua, resultando no aumento do SCR desta barra.

Do ponto de vista da estabilidade a pequenos sinais, todos os casos analisados anteriormente apresentaram autovalores mais amortecidos para maiores SCR. E no caso especial do modo crítico, a relação possui uma influênci significante no seu posicionamento.

A Figura 3.20, apresenta novamente a variação dos autovalores do sistema com o aumento da potência ativa transmitida pelo elo CCAT para um SCR de 1.54 (vermelho) e um SCR de 1.24 (azul) na barra inversora. Para um maior SCR na barra inversora, menor será a sensibilidade do autovalor crítico à variação da potência ativa transmitida pelo elo CCAT.

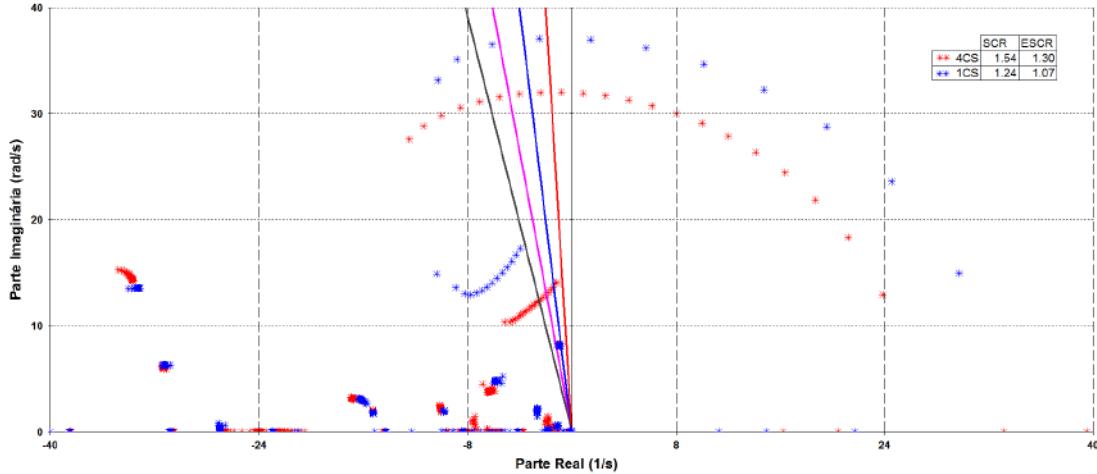


Figura 3.20: Variação dos modos do sistema para o SCR da barra inversora com 1.54 (4 CS) e 1.24 (1 CS) para a variação de potência ativa do elo CCAT.

A Figura 3.21, apresenta o efeito da variação da impedância da linha de transmissão entre a barra inversora e uma barra infinita. A barra infinita foi propositalmente inserida. A reatânciam série da linha é modificada gradativamente desde um valor elevado até zero, para o máximo valor utilizado, o autovalor crítico posiciona-se praticamente no mesmo lugar que para o caso do sistema sem a barra infinita e com o ponto de operação 10, conforme Tabela 3.5, já que foi empregado um valor especificado por polo (VSF) de 1260 MW/polo na simulação. A diminuição gradativa da reatânciam série da linha produz um aumento gradativo do SCR da barra inversora, assim, pode-se observar que, por exemplo, para um SCR de 1.61 o autovalor crítico adquire um amortecimento de 17.7 %, para um SCR de 1.83 um amortecimento de 49.3 % e para um SCR de 3.98 um amortecimento de 98 %. Cabe destacar que o autovalor crítico tem uma elevada sensibilidade para valores de SCR de 0 até 4, para valores mais elevados, o amortecimento entre um valor e outro não aumenta muito.

Observe que, com a inserção da barra infinita, o modo 4, conforme Tabela 3.3, referente ao regulador de velocidade do G1 é instabilizado. Isto é esperado, dado que a inserção é representada por uma máquina, fazendo com que o sistema possua três modos eletromecânicos de interesse.

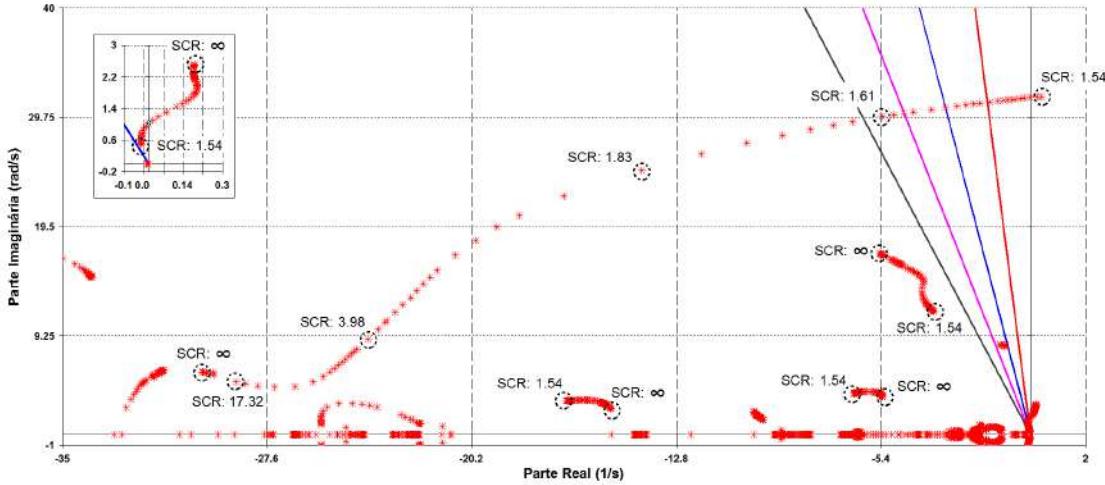


Figura 3.21: Variação dos modos do sistema com a variação do SCR da barra inversora.

### Efeito na barra de interface da retificadora

A variação da impedância da LT interconexão, Figuras 3.7 e 3.17, é um claro exemplo do efeito do SCR da barra retificadora. O aumento gradativo dos parâmetros série da linha reduz principalmente a potência de curto-circuito da barra, produzindo o mesmo efeito produzido pelo aumento do SCR da barra inversora.

Será agora analisado o efeito da impedância de curto-circuito na barra de interface da retificadora, ou seja, o SCR da barra retificadora. Para tal efeito é mantido o SCR da barra inversora do caso base de 1.54, permitindo assim comparar com as respostas anteriores.

A Figura 3.22 apresenta a variação dos modos do sistema com o aumento da potência ativa do elo CCAT para diferentes valores de SCR da barra retificadora. Observa-se que, para uma dada relação de curto-circuito no sistema inversor, quanto maior for o SCR da barra retificadora, menos estável será o sistema.

No caso, para uma potência 1235 MW/polo ou ponto de operação número 9, conforme Tabela 3.5, o modo crítico posiciona-se no limite da estabilidade, no caso com um SCR da retificadora de 5.22. Para um SCR de 4.06 o modo crítico adquire um maior amortecimento. Para menores valores do SCR maior seria o amortecimento do modo crítico, casos não exibidos pela falta de convergência do programa de fluxo de potência.

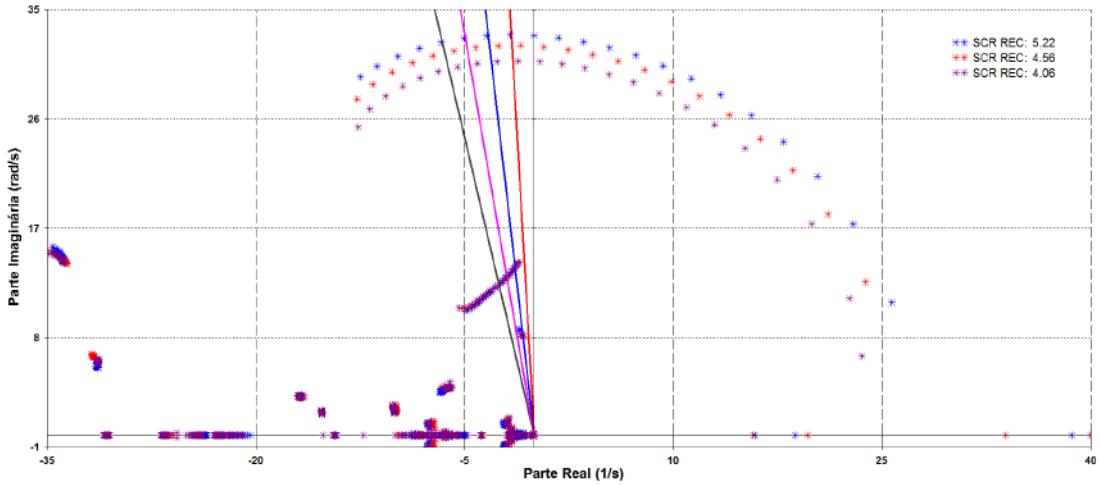


Figura 3.22: Variação dos modos do sistema para o SCR da retificadora com 5.22 (azul), 4.56 (vermelho) e 4.06 (violeta) para a variação de potência ativa do elo CCAT.

O efeito anteriormente descrito pode ser observado novamente para a variação da impedância da linha (entre a barra inversora B2 e barra infinita inserida) e distintos valores do SCR da barra retificadora, conforme Figura 3.23. Para um SCR da retificadora de 4.06, o autovalor crítico não representa uma instabilidade no pior caso, isto é, o caso onde a linha possui uma reatância com valor elevado (SCR da inversora mínima). Já nos casos com SCR de 4.56 e 5.22 na retificadora, o modo crítico representa uma instabilidade.

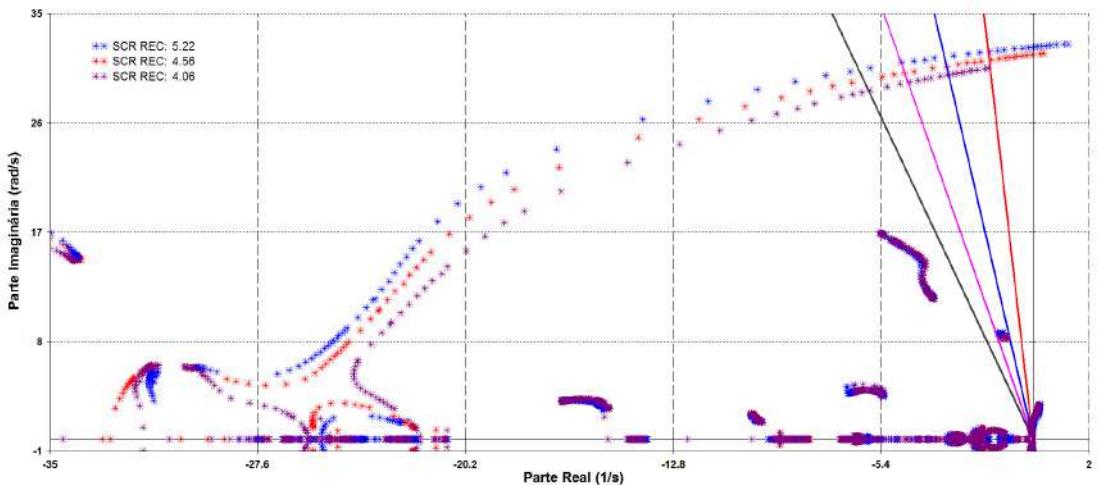


Figura 3.23: Variação dos modos do sistema com a variação do SCR da barra inversora para distintos valores de SCR da retificadora.

### 3.1.5 Avaliação da atuação do controle de erro de corrente - CEC

Após a constatação de que o autovalor crítico é correspondente a um modo proveniente do elo CCAT, como apresentado nas seções anteriores, Figura 3.18d, e que seu posicionamento está intimamente ligado ao SCR das barras de interface, em maior grau à barra inversora, novamente uma análise do desempenho dinâmico do sistema torna-se necessária.

A falta do aparecimento da oscilação proveniente do modo crítico nas respostas não-lineares levou a uma análise mais aprofundada do sistema CC. Desta vez somente é apresentado a resposta da simulação não-linear no domínio do tempo do sistema com o ponto de operação correspondente ao modo crítico posicionado no semiplano direito.

As análises realizadas corresponderam à modificações nos parâmetros do controle do elo CCAT, inibindo um controle por vez e comparando as respostas, o que levou até a malha de controle de erro de corrente (CEC - *current error control*). Esta malha adquire um papel fundamental em sistema com baixo SCR, ou seja, para a integração de sistemas CA ligados ao lado inversor do elo que apresentem baixa potência de curto circuito com relação a potência do sistema CC, caracterizado como um sistema fraco.

O CEC é a malha de controle que modifica a característica estática do controle do elo, Figura 2.3. Quando a corrente estiver entre  $I_{ord_r}$  e  $I_{ord_i}$ , este controle altera ligeiramente o valor de  $\gamma$  do inversor de modo a encontrar um ponto de operação possível. A ação associada a este controle tem como sinal de entrada o erro de corrente  $I_e$ , gerando um sinal proporcional  $\Delta_{CEC}$  a ser adicionado ao controle  $GAMMA_{min}$  ou  $A_{min}$ .

Para a avaliação da influência do CEC sobre as oscilações no sistema, são apresentadas as respostas das simulações com a presença ou não deste controle para a segunda perturbação, descrito na seção 3.1.2.

O elo CCAT está na condição de operação normal, com o retificador controlando a corrente (modo de operação potência constante) e o inversor controlando a tensão (no modo  $A_{min}$ ). A segunda perturbação é aplicada novamente, e a simulação é realizada para o sistema com o modo crítico no semiplano direito, isto é, o sistema no ponto de operação 12, conforme Tabela 3.5.

Em  $t = 100$  ms, a perturbação é aplicada com uma duração total de 100 ms. Durante a falta, no lado do retificador, a tensão CA é levada a 0.914 pu, Figura 3.24 e 3.25, que consequentemente faz com que a tensão CC caia a valores da mesma magnitude, provocando a queda na corrente CC do elo CCAT, Figura 3.26.

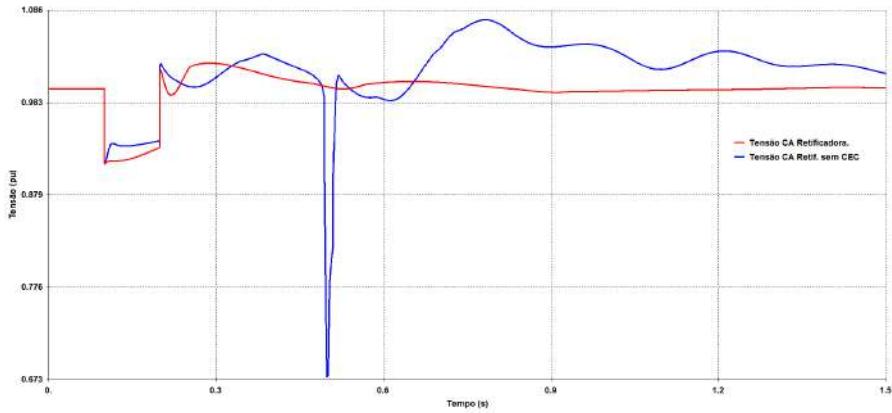


Figura 3.24: Tensão CA da barra retificadora para o caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

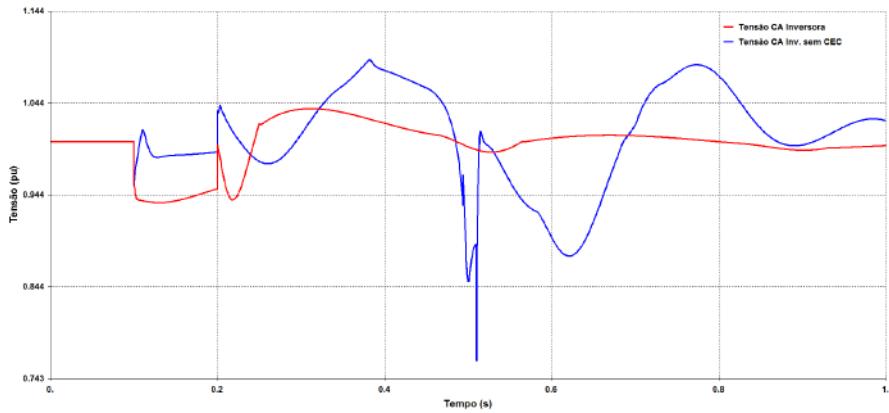


Figura 3.25: Tensão CA da barra inversora para o caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

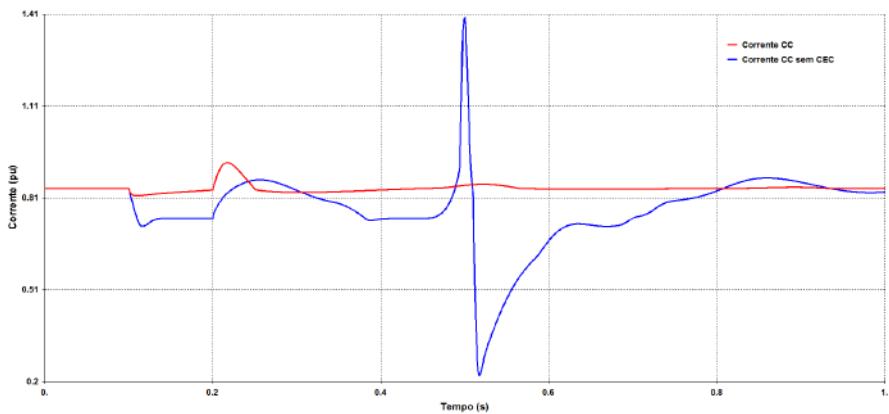


Figura 3.26: Corrente CC em um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

A queda de corrente CC, Figura 3.26, é percebida pelo controle CCA do retificador, através da malha de realimentação, fazendo com que o ângulo  $\alpha$  diminua moderadamente, conforme Figura 3.27.

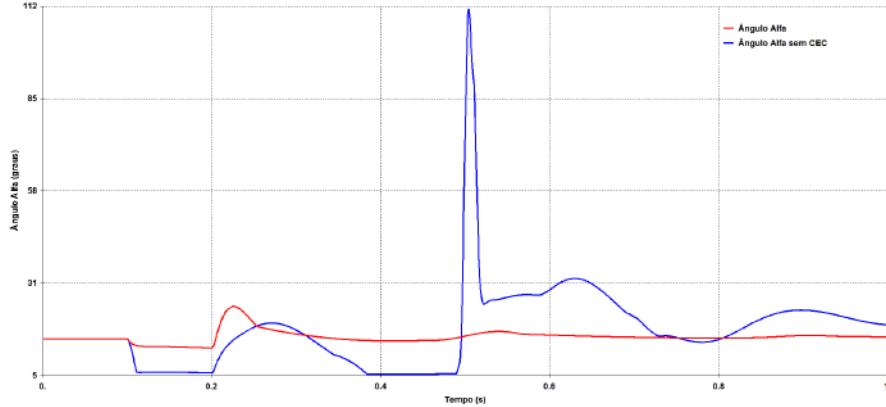


Figura 3.27: Ângulo de disparo  $\alpha$  caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

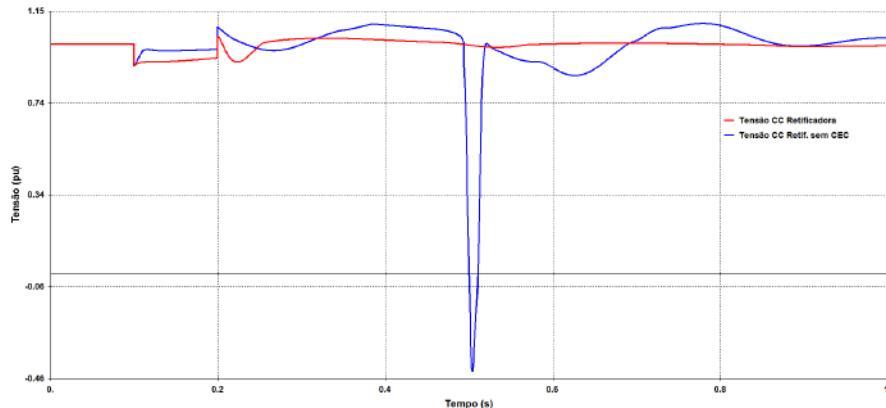


Figura 3.28: Tensão CC da barra retificadora de um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

No instante  $t = 200$  ms o curto é eliminado. As tensões CA se recuperam instantaneamente, decorrentes da modelagem estática da rede CA, conjuntamente com as tensões CC, Figuras 3.28 e 3.29. A recuperação da tensão leva a um aumento na corrente CC da linha e consequentemente da potência CC, que através da realimentação é percebida pelo controle CCA dos retificadores, elevando o ângulo  $\alpha$ , o que leva a uma diminuição da tensão CC e da corrente CC.

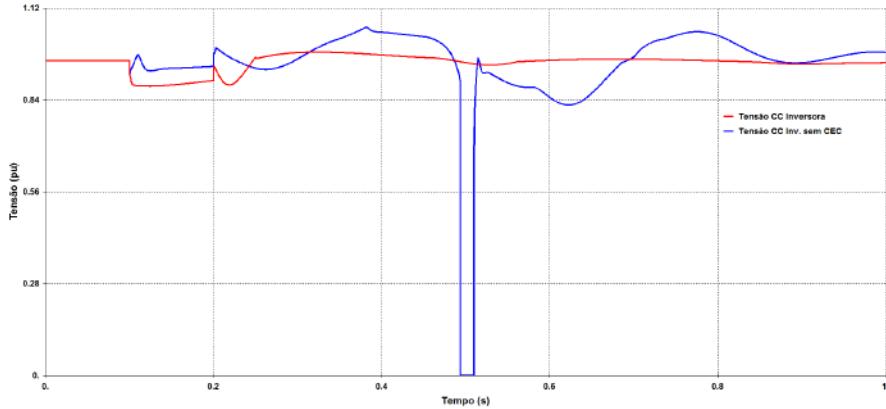


Figura 3.29: Tensão CC da barra inversora de um polo para caso com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

A presença do CEC altera a característica estática do controle do inversor, gerando um sinal de erro entre a ordem de corrente e a corrente medida na linha CC, sinal que modifica o ângulo de extinção  $\gamma_{min}$ . As Figuras 3.30 e 3.31 apresentam o ângulo  $\alpha$  e  $\alpha_{max}$  dos inversores para os caso com e sem CEC, respectivamente.

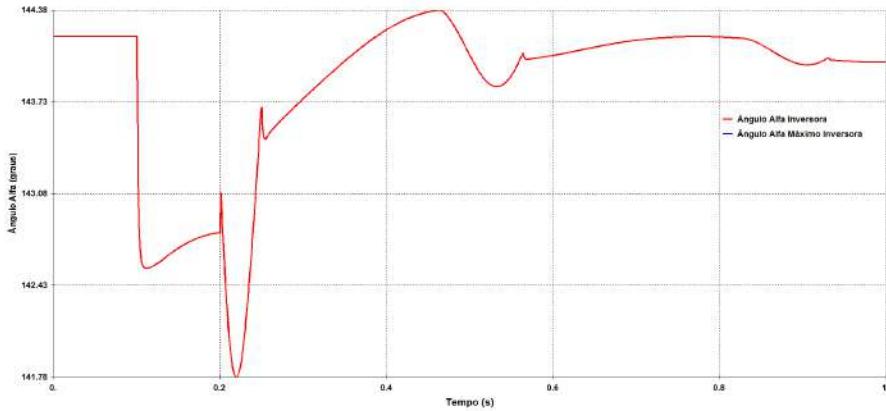


Figura 3.30: Ângulo  $\alpha$  e  $\alpha_{max}$  dos conversores inversores para o caso com CEC.

Note que a diferença entre a corrente CC e a ordem de corrente é maior que zero, o CEC detecta e manda um sinal para o CEA, provocando uma redução no limite de  $\alpha_{max}$  do CCA dos inversores, conforme Figura 3.30. Entretanto, a diminuição do  $\alpha_{max}$  não representa a transferência do controle de corrente do retificador para o inversor, já que os dois ângulos apresentam o mesmo comportamento, indicando que o  $\gamma$  não foi modificado pelo CCA do inversor.

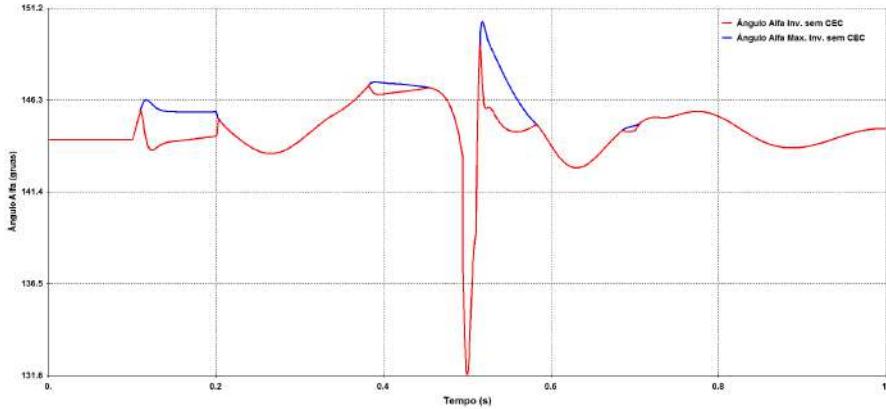


Figura 3.31: Ângulo  $\alpha$  e  $\alpha_{max}$  dos conversores inversores para o caso sem CEC.

Para o caso onde o CEC é inibido, o comportamento do  $\alpha$  e do  $\alpha_{max}$  diferem, conforme Figura 3.31. Este comportamento representa os momentos em que os controladores CCA dos inversores tomam o controle de corrente do elo CCAT. No momento que o ângulo de disparo  $\alpha$  é menor que o ângulo  $\alpha_{max}$ , o inversor começa a controlar a corrente. A diminuição do  $\alpha$  responde a um aumento do  $\gamma$  do CCA do inversor.

Este processo de transferência no controle de corrente por parte do retificador ou do inversor, para o caso sem o CEC é recorrente. Comparando esta resposta com a da Figura 3.27, observa-se que a transferência do controle da corrente do retificador para o inversor ocorre quando o  $\alpha$  do retificador alcança o  $\alpha_{min}$  do CCA, igual a 5 graus.

As Figuras 3.32 e 3.33 apresentam o ângulo  $\gamma$  e o ângulo de comutação para os dois casos. Nota-se que, para o caso com o CEC, os ângulos apresentam um comportamento menos abrupto que para o caso sem. A diferença no comportamento

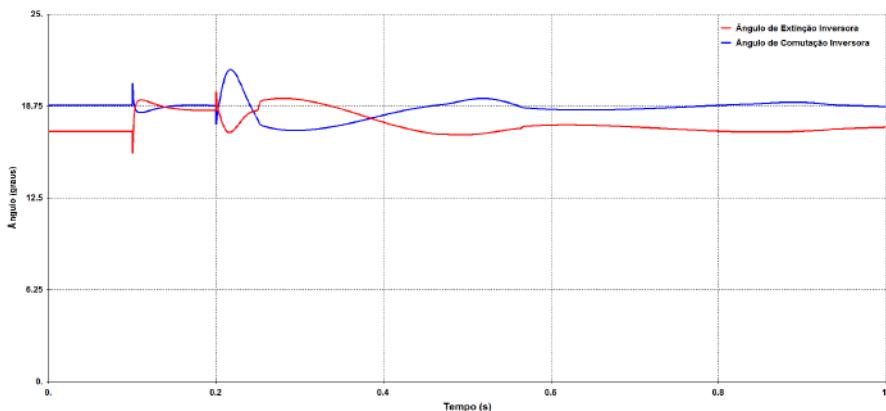


Figura 3.32: Ângulo  $\gamma$  e de comutação dos conversores inversores para o caso com CEC.

ocorre uma vez que, durante a falha, o  $\alpha_{max}$  diminui para o caso com CEC e o aumento do ângulo  $\gamma$  não influencia no ângulo de comutação. Já para o caso sem o CEC, o aumento de  $\alpha_{max}$ , conjuntamente com o aumento de  $\gamma$ , levam a uma diminuição considerável do ângulo de comutação.

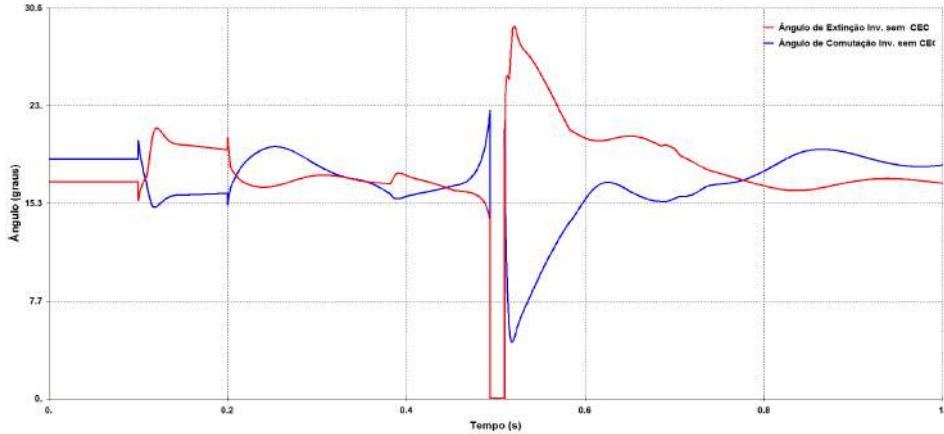


Figura 3.33: Ângulo  $\gamma$  e de comutação dos conversores inversores para o caso sem CEC.

A perturbação no sistema, para os casos com ou sem o CEC, sensibiliza o VDCOL e o RIAC do controle do elo CCAT.

Para o sistema com o CEC, o VDCOL é sensibilizado unicamente durante a falta, uma vez que a tensão CC é reduzida a um valor abaixo da tensão especificada para a atuação deste controle, de 0.93 pu. Observa-se uma melhoria no desempenho dinâmico no instante da retirada da falta.

Para o sistema sem o CEC, tanto a malha de controle VDCOL quanto o RIAC atuam. O RIAC atua no sentido de aumentar os amortecimentos através do CCA do retificador, limitando o canal integrador do controlador PI e melhorando a resposta transitória no tempo. No caso referido, a tensão CC é rapidamente elevada após a aplicação da falha por atuação do CCA do inversor, limitando a atuação do VDCOL durante a falta. Porém, o VDCOL se torna primordial na recomposição do sistema CC após cada falha de comutação desenvolvida na simulação, sem ele a simulação diverge após a primeira falha de comutação.

Como descrito acima, para o caso do sistema sem o CEC, o controlador do inversor toma o controle da corrente do elo por alguns instantes e de maneira intermitente, observado na Figura 3.31. Durante a perturbação, o ângulo  $\alpha$  do retificador alcança o limite inferior,  $\alpha_{min}$ , e o inversor se estabelece como o controlador da corrente do elo. Após a eliminação da perturbação, o CCA do retificador volta a controlar a corrente, e o sistema desenvolve uma situação insustentável, onde as tensões CC da barra retificadora e inversora elevam-se gradativamente após um curto período

de redução (pela ação do CCA do retificador). Com a elevação das tensões (barra retificadora e inversora) e redução da corrente o CCA do retificador, que está no controle da corrente do elo, novamente alcança o limite inferior e o CCA do inversor passa a controlar a corrente. Neste mesmo período o ângulo  $\alpha_{max}$  aumenta, produzindo a diminuição do ângulo de comutação e extinção  $\gamma$ . A diminuição do  $\gamma$  ultrapassa o limite mínimo predeterminado para este parâmetro, o que leva a uma falha de comutação nos conversores inversores, que em programas de estabilidade transitória é representado pela redução a zero da tensão CC da barra inversora, conforme Figura 3.29. O valor de  $\gamma$  mínimo estipulado é de 14.1 graus com uma duração mínima de 16 milissegundos. Cabe destacar que a falha de comutação é uma consequência da condição operativa inaceitável, é recorrente e sempre acontece precedido pela operação do sistema CC sendo controlado pelo inversor, conforme Figura 3.34.

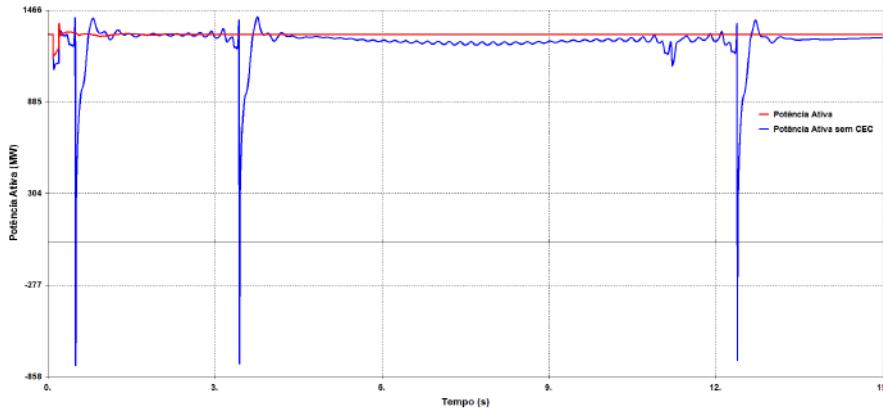


Figura 3.34: Potência ativa de um polo na condição de retificador para o caso com (vermelho) e sem (azul) CEC.

### 3.1.6 Bifurcação de Hopf

#### Aproximação ao Eixo Imaginário

Com o intuito de chegar ao ponto exato onde ocorre a bifurcação de Hopf, muda-se o passo entre os pontos de operação definidos na Tabela 3.5. Com uma variação de MW nos bipolos em menor grau, de 2 MW/polo, entre os pontos de operação 9 e 10 (pontos onde o autovalor crítico passa ao semiplano direito) é realizado uma aproximação do modo crítico ao eixo imaginário, conforme Tabela 3.12.

A nova simulação dos autovalores do sistema com os novos pontos de operação para a aproximação ao eixo imaginário são mostrados na Figura 3.35. Percebe-se que o sistema com o autovalor crítico passa ao SPD entre o novos pontos 7 e 8, conforme Tabela 3.13.

Tabela 3.12: Novos pontos de operação para a aproximação entre os PO 9 e 10.

	Novos PO	VSF [MW/polo]
Ponto 9	1	1235
	2	1237
	3	1239
	4	1241
	5	1243
	6	1245
	7	1247
	8	1249
	9	1251
	10	1253
	11	1255
	12	1257
	13	1259
Ponto 10	14	1260

A BH é associada a um par de autovalores (polos) complexos conjugados cruzando o eixo imaginário quando um parâmetro do sistema é variado, ou seja, acontece quando o sistema faz a transição entre o SPE e SPD, mecanismo que leva a uma oscilação das tensões do sistema, podendo ser sustentadas (supercrítica) ou não (subcrítica) [16]. O parâmetro empregado neste caso é o valor especificado por polo em MW/polo a ser transmitido pelo elo CCAT, ou seja, a ordem de potência.

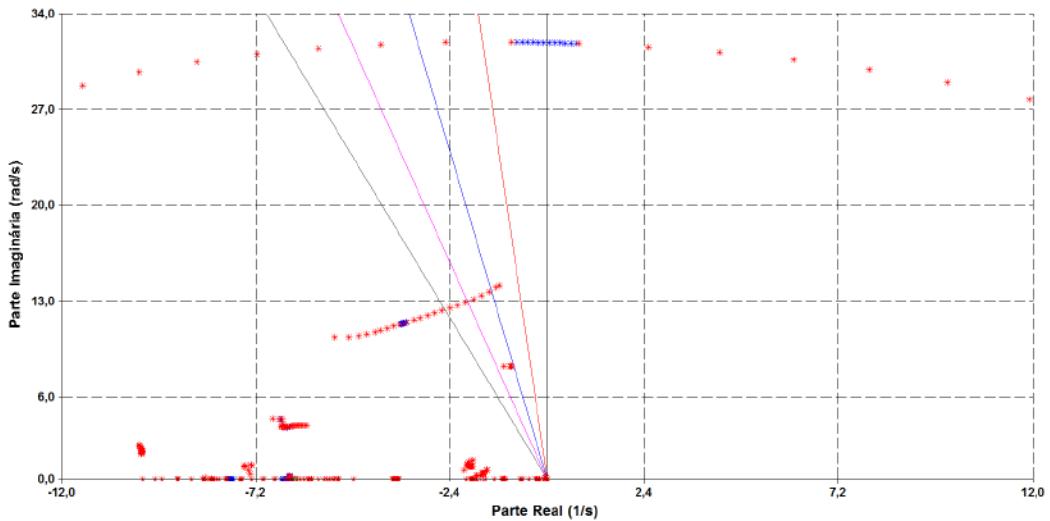


Figura 3.35: Aproximação (em azul) dos autovalores entre os PO 9 e 10.

Tabela 3.13: Autovalores dos novos pontos de operação 7 e 8 para a aproximação ao eixo imaginário.

Novo ponto de operação 7					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	-0.082	31.877	5.073	0.26	EQ" CS-4MQ #3
3	-0.915	8.242	1.312	11.04	WW GEN2 #21
5	-3.561	11.390	1.813	29.84	WW CS-4MQ #3
7	-0.044	0.098	0.016	40.91	RV_GEN1 #940
9	-6.428	3.814	0.607	86.00	EQ' GEN2 #21
11	-1.869	0.920	0.147	89.71	RV_GEN1 #940

Novo ponto de operação 8					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	0.052	31.868	5.072	-0.16	EQ" CS-4MQ #3
3	-0.915	8.242	1.312	11.04	WW GEN2 #21
5	-3.548	11.402	1.815	29.71	WW CS-4MQ #3
7	-0.044	0.098	0.016	40.87	RV_GEN1 #940
9	-6.426	3.815	0.607	85.99	EQ' GEN2 #21
11	-1.869	0.920	0.147	89.72	RV_GEN1 #940

A partir do no PO 7 e com ajuda da ferramenta *Hopf Bifurcation* do PACDYN varia-se o ganho, neste caso específico, do regulador de tensão (RAT) do compensador síncrono, de maneira a obter um ponto de operação com o autovalor crítico exatamente sobre o eixo imaginário, conforme a Figura 3.36.

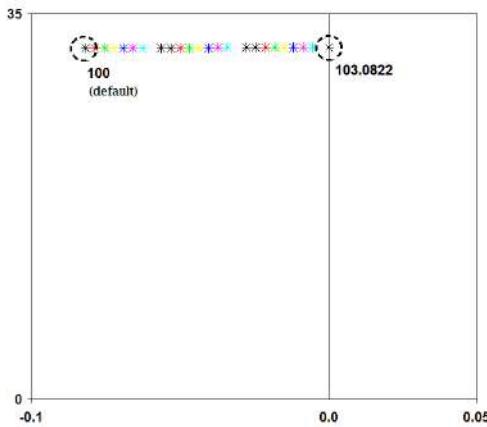


Figura 3.36: Variação do ganho Ka do RAT do compensador síncrono, a partir do novo PO 7.

O valor do ganho Ka do RAT do compensador síncrono necessário para obter um polo complexo sobre o eixo imaginário é de 103.0822 pu. Por conseguinte, modifica-se o valor do parâmetro predeterminado do RAT nos dados do tipo CDU

do sistema e com a modificação o autovalor crítico posiciona-se exatamente sobre o eixo imaginário para o PO 7 (modificado), conforme Tabela 3.14 e Figura 3.37.

Tabela 3.14: Autovalores para o ponto de operação 7 modificado.

Novo ponto de operação 7 modificado					
N	Real	Imaginário	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de part.
1	-2.43E-07	31.976	5.089	7.61E-07	EQ" CS-4MQ #3
3	-0.912	8.244	1.312	10.99	WW GEN2 #21
5	-3.522	11.394	1.814	29.53	WW CS-4MQ #3
7	-0.044	0.098	0.016	40.94	RV_GEN1 #940
9	-6.411	3.738	0.595	86.39	EQ' GEN2 #21
11	-1.854	0.937	0.149	89.25	RV_GEN1 #940
13	-33.940	14.739	2.346	91.72	RT_GEN1 #900
15	-1.599	0.427	0.068	96.62	RV_GEN1 #940

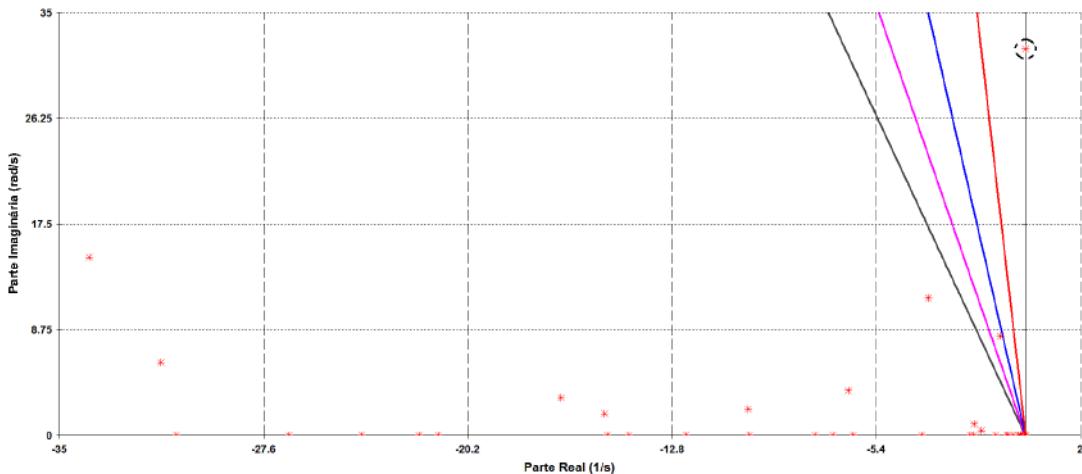


Figura 3.37: Autovalores do sistema para o PO 7 modificado.

### Retrato de Fase - modelo completo

Uma vez que o fenômeno é essencialmente não-linear, determinar o tipo de BH não é possível somente através de uma análise dos autovalores do sistema, portanto, faz-se necessário a utilização de programas de análise de transitórios eletromecânicos. As simulações dinâmicas são realizadas aplicando um degrau na ordem de referência (corrente ou potência) do elo CCAT, retornando a seu valor nominal após um certo período (*bumped*) [16]. Além disso, também é simulada a resposta do sistema para um degrau na ordem de potência sem retorno ao valor nominal (*step*).

As Figuras 3.38 e 3.39 apresentam os retratos de fase (*phase portrait*) do compensador síncrono para os dois tipos de distúrbios empregados, o *step* e o *bumped*.

Enquanto que, as Figuras 3.40 e 3.41 apresentam o perfil de tensão CA desenvolvido na barra inversora (B2) do sistema para as perturbações.

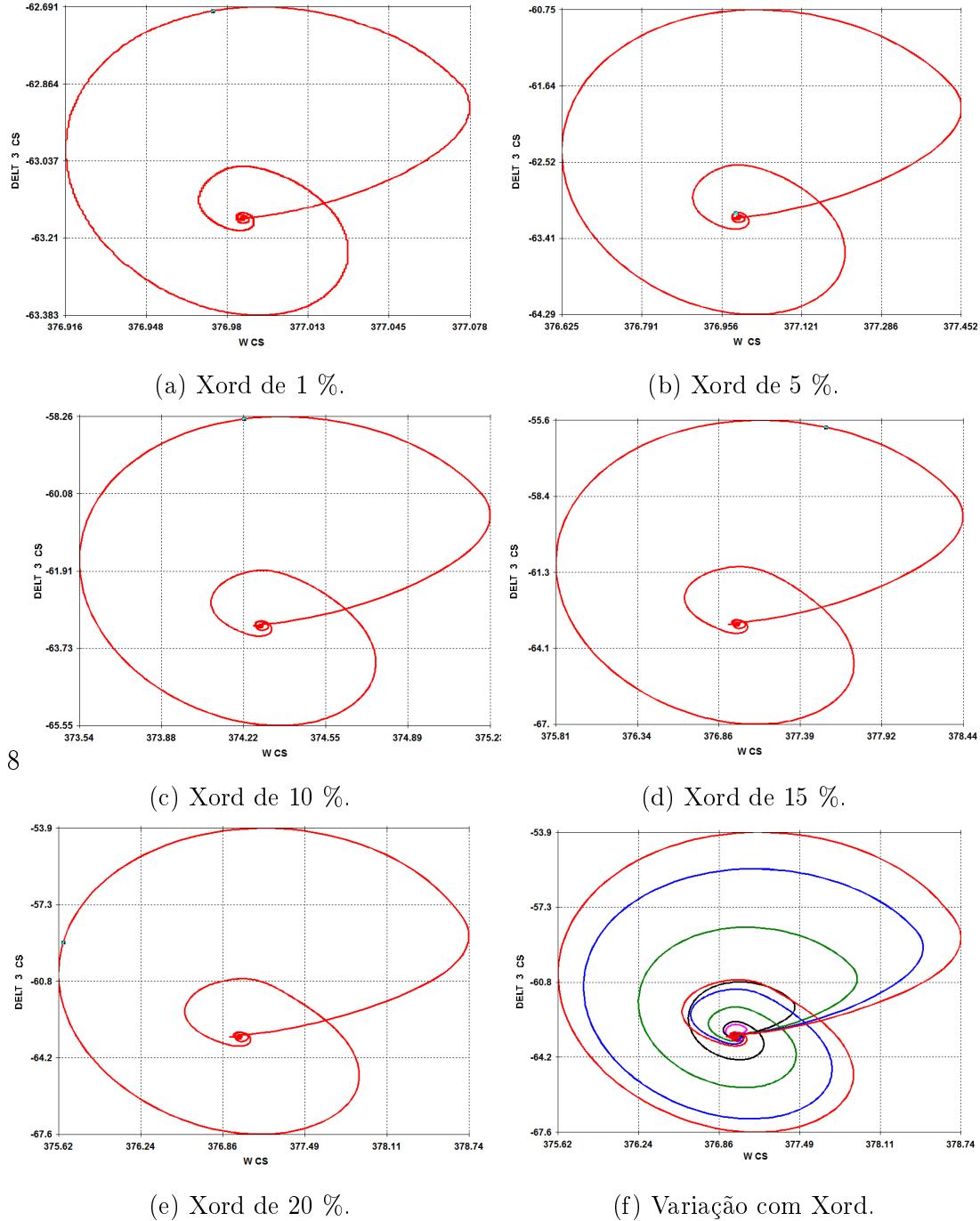


Figura 3.38: Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo *bumped*.

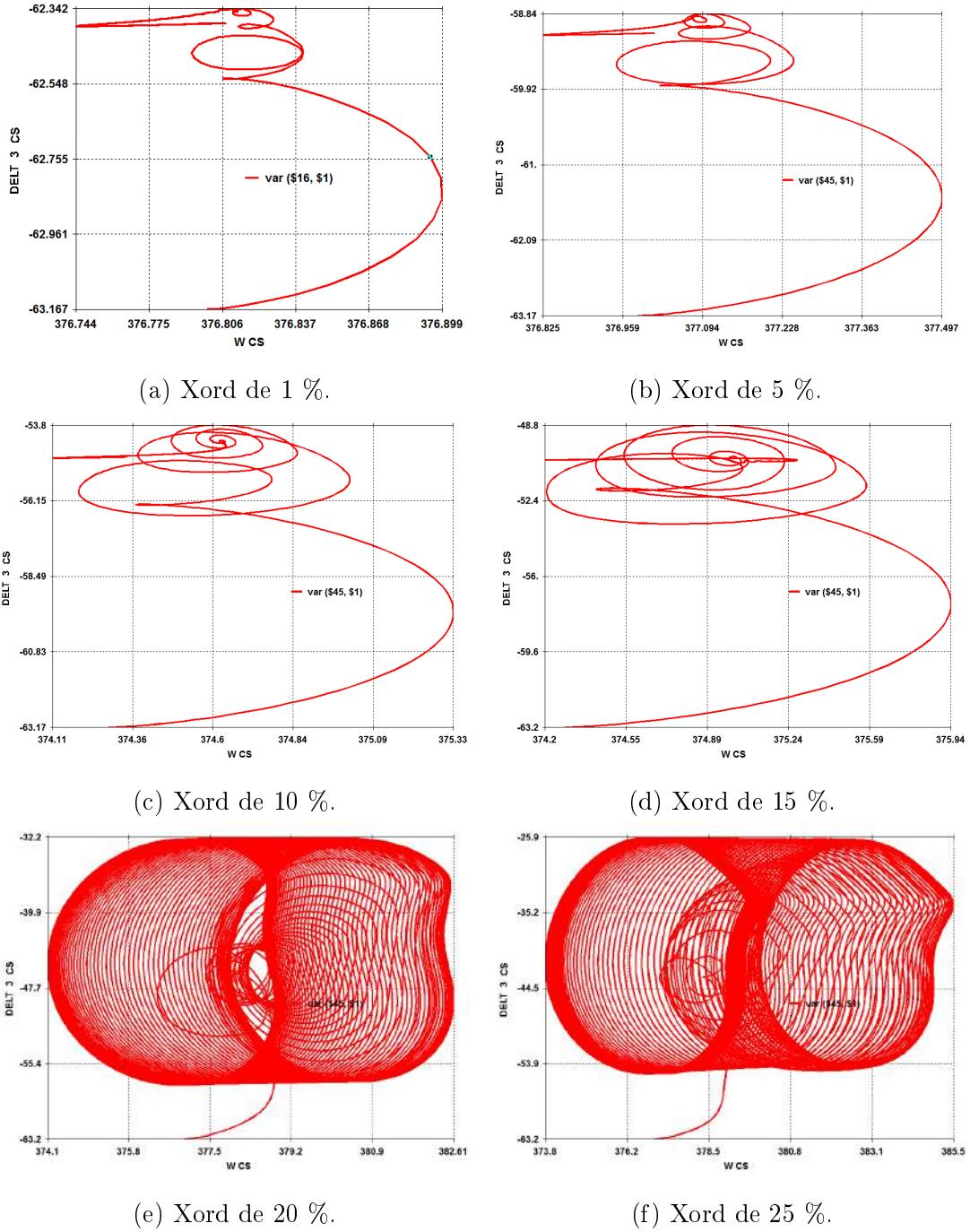


Figura 3.39: Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo *step*.

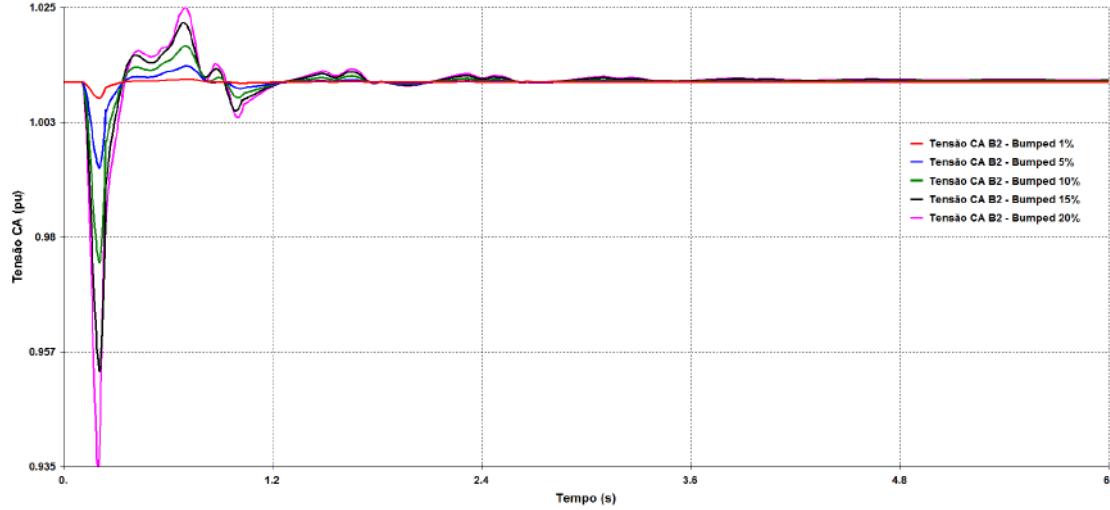


Figura 3.40: Tensões CA da barra inversora (B2) para diferentes ordens de referência do tipo *bumped* - vermelho (1 %), azul (5 %), verde (10 %), preto (15 %) e rosa (20 %).

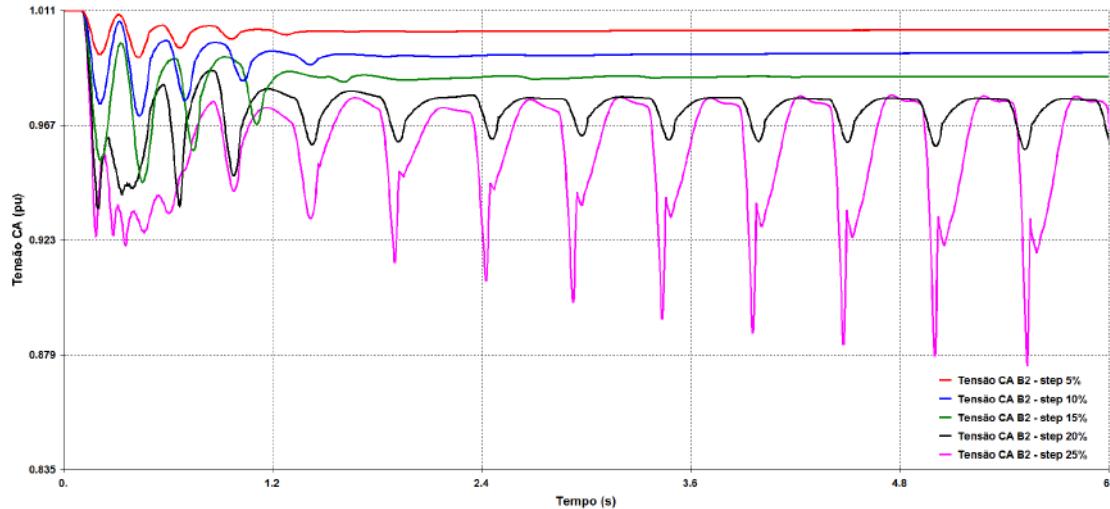


Figura 3.41: Tensões CA da barra inversora (B2) para diferentes ordens de referência do tipo *step* - vermelho (5 %), azul (10 %), verde (15 %), preto (20 %) e rosa (25 %).

No caso das perturbações do tipo *bumped*, Figura 3.38, por serem menos severas não criam oscilações suficientes para determinar os ciclos limites que são uma característica das bifurcações de Hopf, nem mesmo distúrbios mais severos com duração de 400 ms e omitidos no trabalho foram frutuosos.

As perturbações tipo *step* na ordem de potência, Figura 3.39, mesmo apresentando uma resposta característica de um BH supercrítica, não podem ser utilizados como referências visto que os casos com tal particularidade correspondem aos *steps*

de 20 % e 25 % na ordem de potência e estas representam uma alteração muito distante do ponto de operação inicial.

### **Retrato de Fase - sem CEC**

As respostas das simulações do sistema no ponto de bifurcação, ou seja, o ponto de operação onde o autovalor crítico posiciona-se no eixo imaginário, não apresentaram as características desejáveis de maneira a poder determinar o tipo de bifurcação de Hopf. Portanto, seguindo o critério da seção anterior, as seguintes respostas correspondem ao sistema com o controle auxiliar CEC bloqueado.

Primeiramente, são apresentadas as tensões CA da barra inversora (B2) para as simulações dos três pontos de operação utilizados na seção 3.1.2, correspondendo ao PO 6 (autovalor crítico bem amortecido), PO 9 (perto do eixo imaginário) e PO 10 (no SPD), conforme a Tabela 3.5.

A aproximação ao eixo imaginário realizada na seção 3.1.6, correspondente ao PO 7 modificado da Tabela 3.12, é novamente utilizada para realizar novos retratos de fase no ponto de bifurcação, empregando simulações do tipo *bumped* ou *step* na ordem de potência.

A Figura 3.42 apresenta as tensões na barra inversora para um *bumped* de 1 % ou 5 % na ordem de potência de 100 ms de duração. Enquanto que, a Figura 3.43 apresenta as tensões para um *step* de 1 % ou 5 % na ordem de potência dos polos.

Observe que as respostas às duas perturbações, para o caso do CEC bloqueado, o sistema apresenta a oscilação correspondente ao ponto de operação, ou seja, ao cruzamento do modo crítico do semiplano esquerdo ao semiplano direito com o aumento gradativo da potência ativa transmitida pelo elo CCAT, congruente com as simulações lineares da seção 3.1.2.

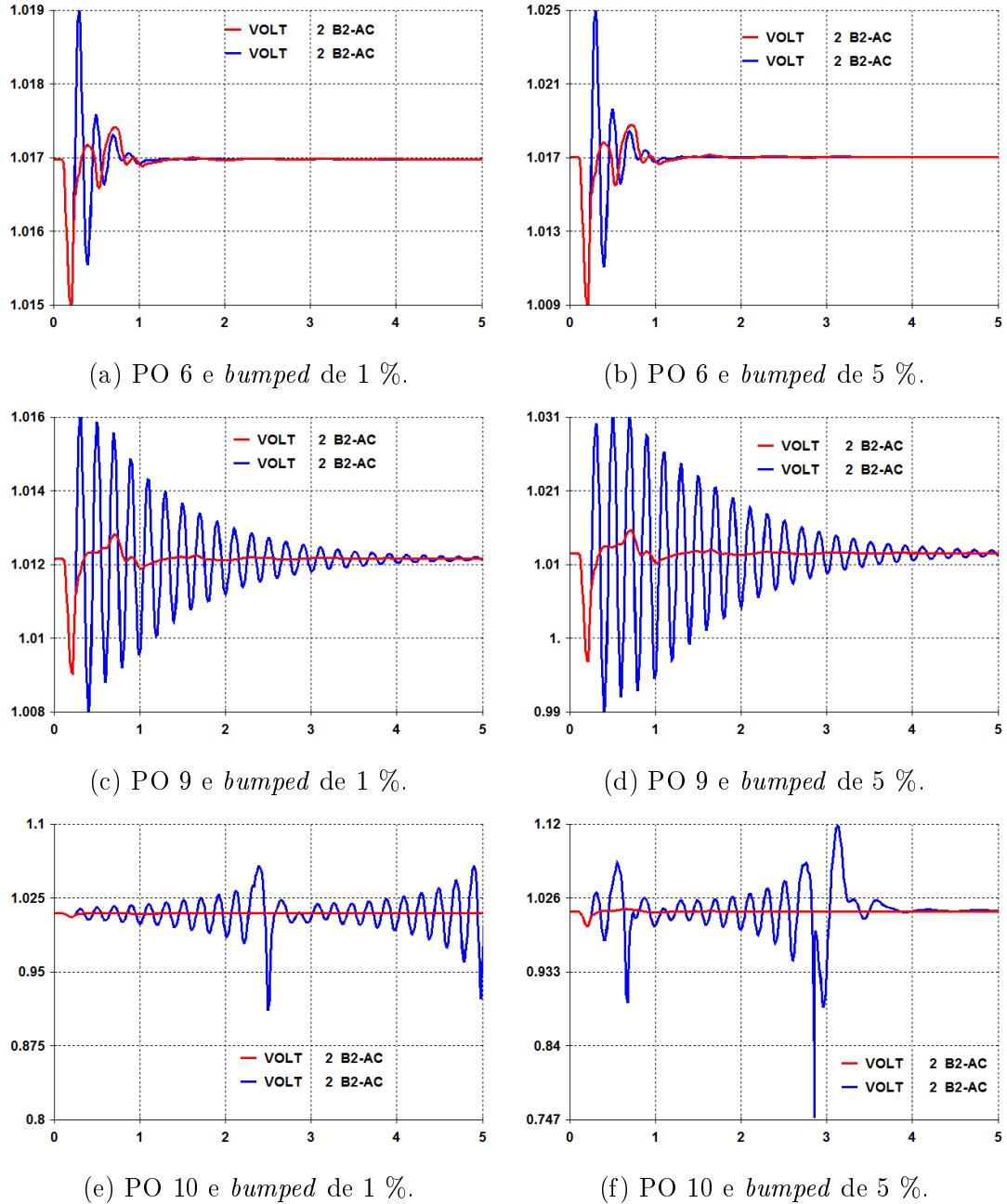
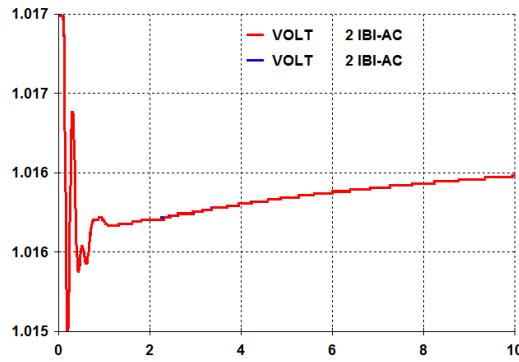
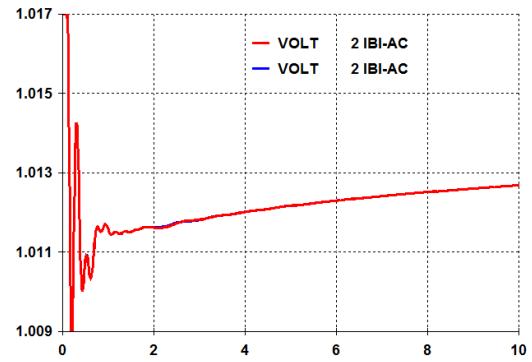


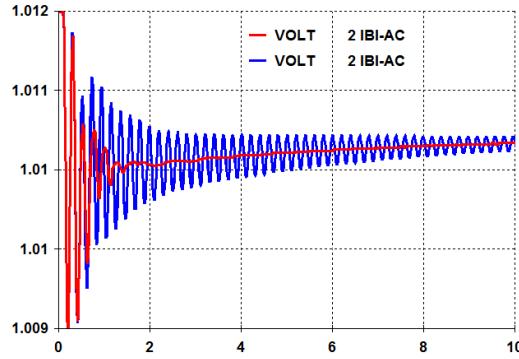
Figura 3.42: Tensões CA da barra inversora (B2) para os pontos de operação referidos e distúrbio do tipo *bumped* - com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).



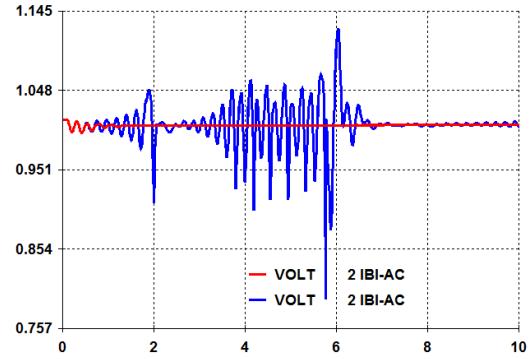
(a) PO 6 e *step* de 1 %.



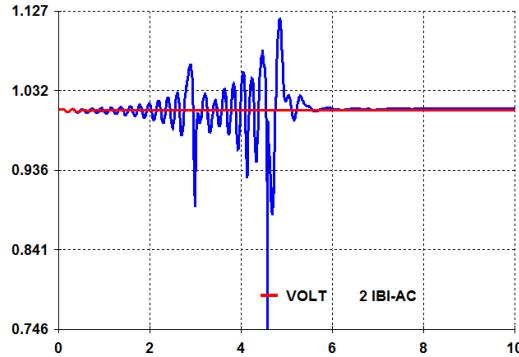
(b) PO 6 e *step* de 5 %.



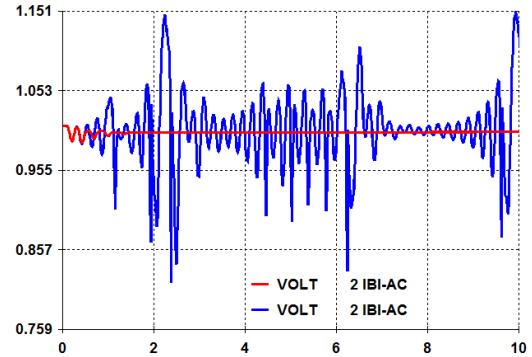
(c) PO 9 e *step* de 1 %.



(d) PO 9 e *step* de 5 %.



(e) PO 10 e *step* de 1 %.



(f) PO 10 e *step* de 5 %.

Figura 3.43: Tensões CA da barra inversora (B2) para os pontos de operação referidos e distúrbio do tipo *step* - com CEC (vermelho) e sem CEC (azul).

No ponto de operação PO 6, o sistema possui um amortecimento de 11.01 %, o autovalor crítico 17.4 % de amortecimento e uma frequência 5.02 Hz. A resposta do sistema apresenta oscilações para o bloqueio da atuação do CEC, podendo ser percebidas nas respostas ao *bumped*, Figura 3.42a e 3.42b, mas não ser percebidas na resposta do sistema ao *step*, Figuras 3.43a e 3.43b. No PO 6 o elo CCAT está transmitindo 1160 MW por polo, conforme Tabela 3.5.

No ponto de operação PO 9, o autovalor crítico possui um amortecimento de 2.48 %, frequência de oscilação de 5.09 Hz e, visto que o autovalor crítico é o autovalor menos amortecido, o sistema como um todo também possui o mesmo amortecimento. Como esperado, as respostas do sistema ao *bumped* mostram as mesmas oscilações do ponto de operação anterior com menos amortecimento, Figuras 3.42d e 3.42e. Já no caso do *step*, para o caso de 1 % na ordem de potência, o elo CCAT passa de VSF 1235 MW/polo para 1247.35 MW/polo, sendo este último valor o limiar de estabilidade, conforme Tabela 3.12. Desta forma o modo é excitado o suficiente para ser percebido, Figura 3.43c. Já para o caso de 5 % na ordem de potência, passa-se a um valor de VSF 1296.3 MW/polo, bem mais além do limiar da estabilidade, o que faz com que o autovalor crítico passe ao SPD instabilizando o sistema, Figura 3.43d.

No ponto de operação PO 10, o sistema possui o autovalor crítico com amortecimento negativo de 2.73 % e frequência de 5.07 Hz. Com o sistema instável no ponto de operação inicial, qualquer tipo de distúrbio deveria levar ao colapso, mas as respostas do sistema tanto para o *bumped* quanto para o *step* empregando a malha de controle CEC não apresentam as oscilações esperadas. Já no caso do bloqueio desta malha, o sistema mesmo não colapsando totalmente, responde de maneira cíclica (explicado a seguir), conforme Figuras 3.42e, 3.42f, 3.43e e 3.43f.

Uma explicação detalhada da diferença entre as respostas do sistema para o bloqueio da atuação ou não do controlador de erro de corrente (CEC) é apresentado na seção 3.1.5. Condizente com a explicação na seção referida, cabe ressaltar que em nenhum dos casos obteve-se um colapso total do sistema, ou seja, as simulações prosseguem com as oscilações num aumento progressivo periódico até a ocorrência de uma falha de comutação e novamente se recompõe desenvolvendo uma nova falha de comutação, e assim sucessivamente como uma resposta cíclica.

A seguir são apresentados os retratos de fase para o PO 7 modificado, com o autovalor crítico posicionado no eixo imaginário.

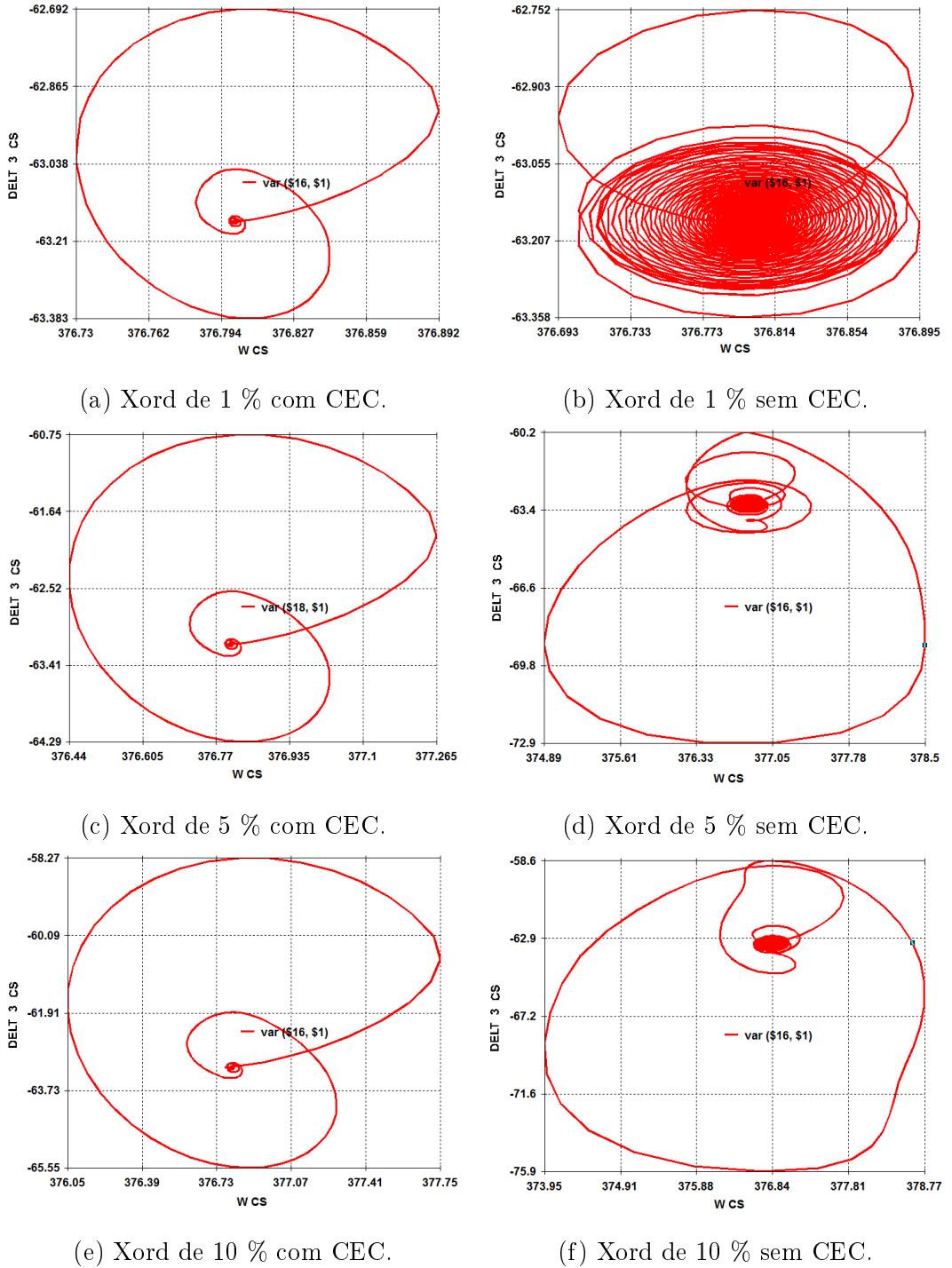


Figura 3.44: Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo *bumped* com ou sem o CEC.

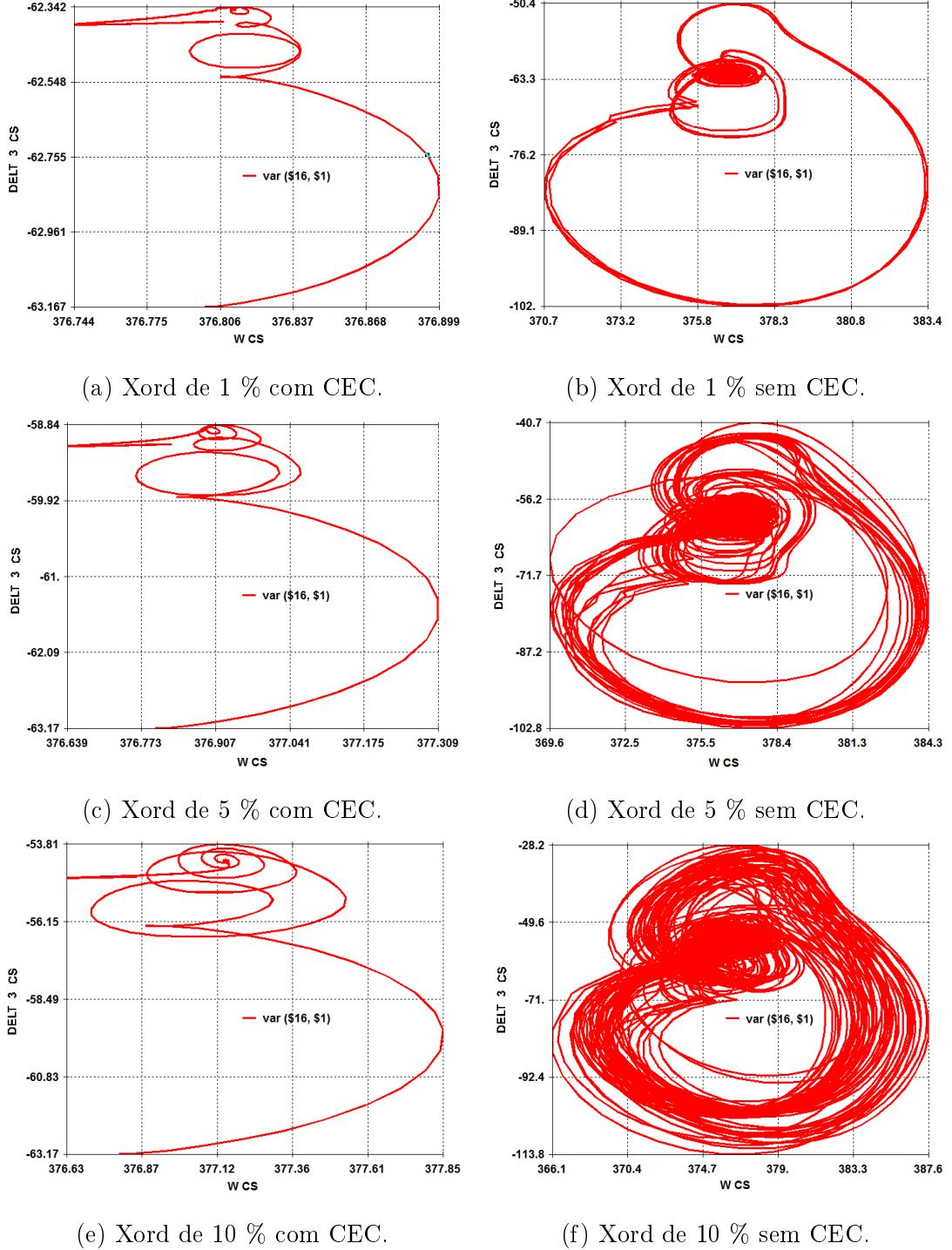


Figura 3.45: Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS para diferentes ordens de referência do tipo *step* com ou sem o CEC.

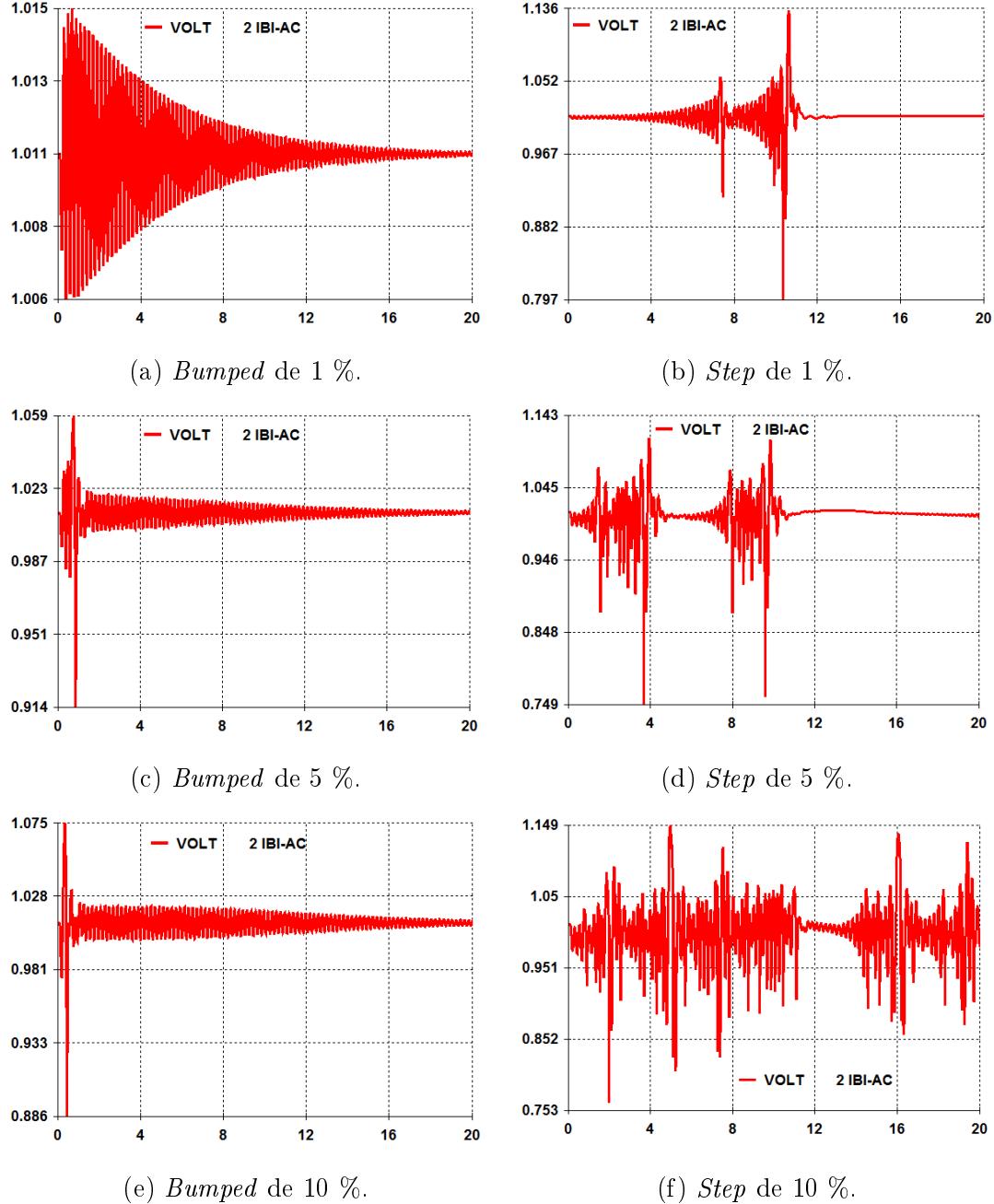


Figura 3.46: Tensões CA da barra inversora (B2) para o ponto de bifurcação e distúrbios do tipo *bumped* e *step* sem CEC.

Os retratos de fase das Figuras 3.44 e 3.45, apresentam as respostas dos sistema para diferentes ordens de potência do tipo *bumped* ou *step*, sendo comparadas para os dois casos analisados, com o CEC e sem o CEC. As respostas apresentadas nos retratos seguido pelo perfil de tensão CA desenvolvido na barra inversora (B2) para os casos sem CEC, Figura 3.46, evidenciam que mesmo com a ocorrência da bifurcação o ciclo limite estável ou instável não pode ser determinado.

As grandes excursões desenvolvidas nos retratos de fase das respostas dos demais

casos sem o CEC são devido as ocorrências das falhas de comutação e recomposição durante a simulação.

### Retrato de Fase - sem CEC e sem VDCOL

Será agora analisado o efeito de outra malha de controle que também não está presente no modelo a pequenos sinais do elo CCAT e não é levado em consideração na modelagem das referências [6, 16] para as análises da bifurcação de Hopf. Definido na seção 2.6.2, o VDCOL é responsável pela redução da ordem de corrente do sistema em função da tensão CC do conversor.

A seguir, a Figura 3.47 apresenta os retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do compensador síncrono e as tensões CA da barra inversora para diferentes ordens de potência do tipo *bumped* sem o CEC e sem VDCOL. No caso das tensões CA apresentas, as mesmas são comparadas para os casos sem o CEC.

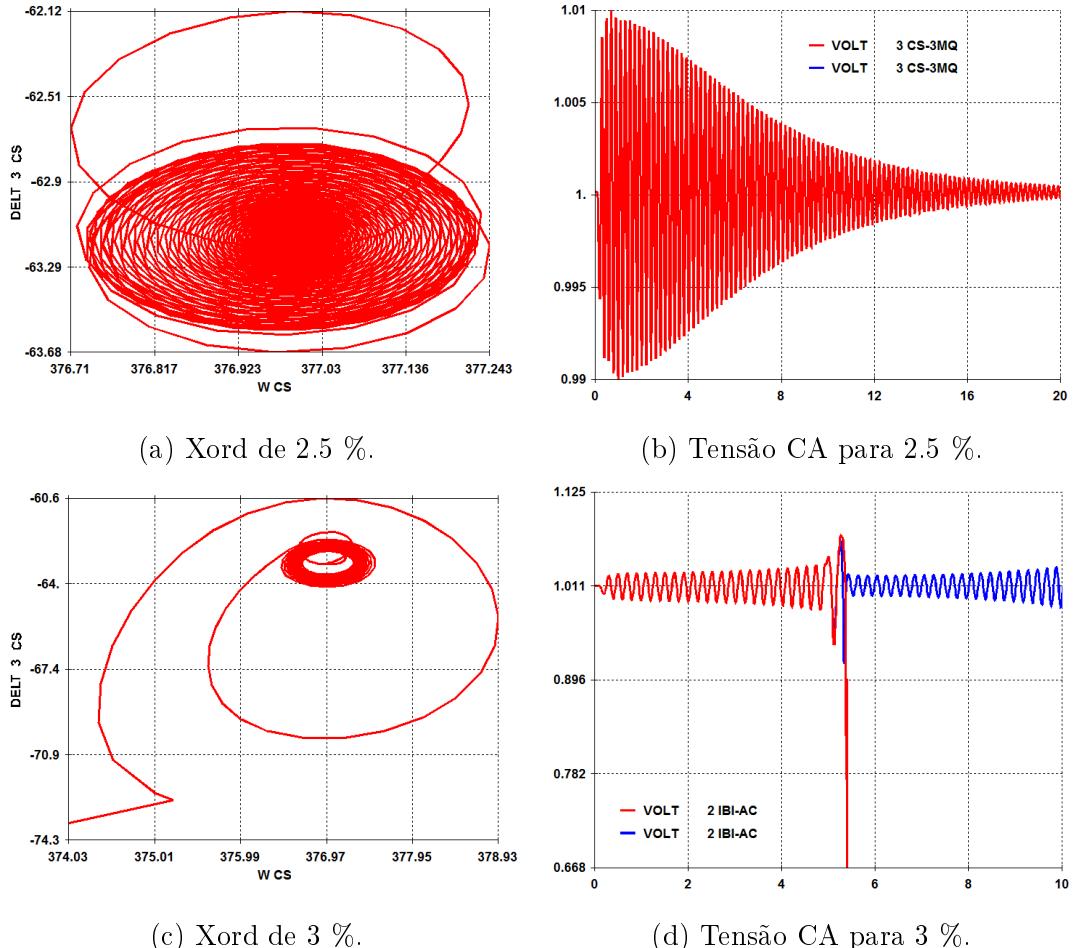


Figura 3.47: Retratos de fase ( $\delta/\omega$ ) do CS e tensões CA da barra inversora para diferentes ordens de referência do tipo *bumped* sem o CEC e sem VDCOL.

Observe que a simulação do *bumped* de 2.5 % e de 100 ms de duração apresenta o mesmo perfil de tensão CA da barra inversora tanto para o caso sem CEC/VDCOL como para o caso sem CEC, Figura 3.47b. Por ser uma perturbação mínima o limiar para a atuação do VDCOL não é alcançado. Motivo pelo qual o retrato de fase para *bumped* de 1 % é omitido, mas pode ser observado na Figura 3.44b.

O VDCOL é primordial durante a recuperação do sistema após faltas CA e falhas de comutação. Este aspecto pode ser observado na resposta do sistema ao *bumped* de 3 % e 100 ms de duração, onde as oscilações de tensão da barra de interface da inversora vão em aumento até a ocorrência de uma falha de comutação, após a falha o sistema é incapaz de se recompor, Figura 3.47d. Ressalva-se que a falha de comutação é uma consequência da condição operativa inaceitável.

Com os retratos de fase das Figuras 3.47a e 3.47c, é possível observar que o sistema perde a estabilidade para o *bumped* de 3 % mas recupera o equilíbrio para o *bumped* de 2.5 %. Ou seja, o sistema perde a estabilidade para uma perturbação suficientemente grande, mas recupera o equilíbrio para uma perturbação suficientemente pequena, o que implica a existência de um ciclo limite instável em torno ao ponto de operação estável. Por conseguinte, o fenômeno é caracterizado por seu uma bifurcação de Hopf com comportamento subcrítico.

### 3.2 Sistema Exemplo do ANATEM

Com o intuito entender melhor os autovalores relativos aos elos de corrente contínua, apresenta-se uma série de simulações mostrando o comportamento destes e especificamente do modo crítico em diferentes situações, para um sistema de corrente contínua convencional. As simulações são realizadas a partir de um sistema exemplo do ANATEM, que inclui um elo CCAT.

O diagrama unifilar é mostrado a seguir, Figura 3.48. O sistema é apropriado, visto que sistemas em CCAT do tipo analisado neste trabalho (LCC) são normalmente empregados para a transmissão de grandes montantes de energia provenientes de usinas hidrelétricas distantes dos centros urbanos.

Basicamente, a partir das constatações no sistema anterior percebe-se que o valor da relação de curto-círcuito, tanto para barra de interface da retificadora, como da inversora, têm um papel fundamental no sistema e nos autovalores deste. Logo, tendo em vista este parâmetro, realiza-se simulações no sistema exemplo sem modificação da sua topologia.

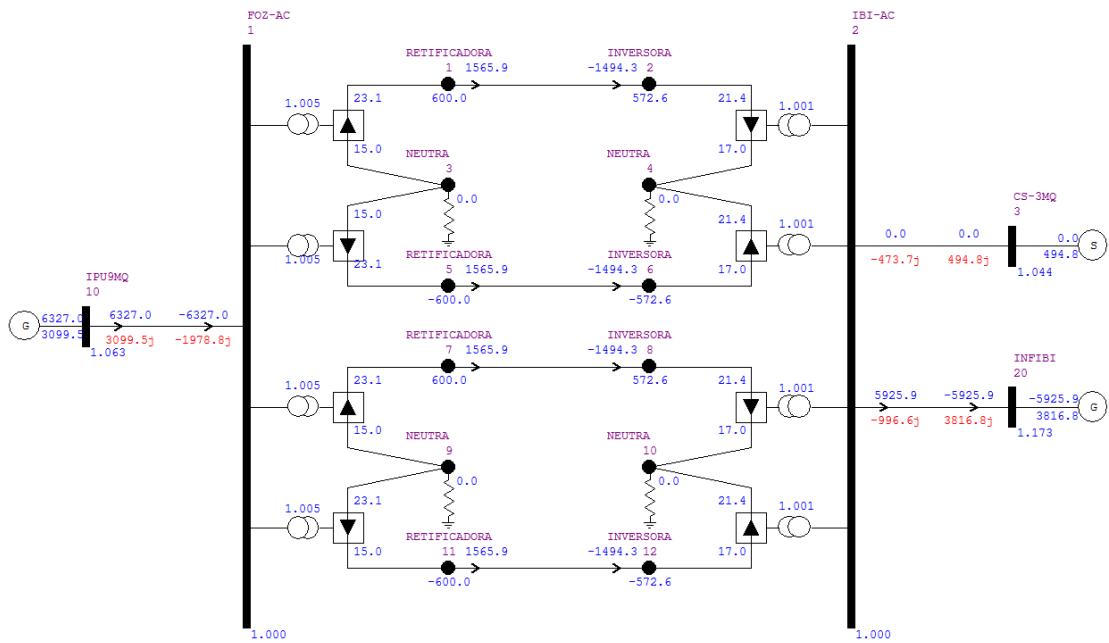


Figura 3.48: Diagrama unifilar do sistema exemplo.

As simulações correspondem a:

- **Variação do Setpoint HVDC**, variação da potência ativa MW transmitida no elo CC;
- **Variação da LT Binf**, variação da reatância série da linha de transmissão entre as barras 2 (inversora) e 20 (barra infinita) do sistema;

- **Variação da LT Retificadora**, variação da reatância série da linha de transmissão entre as barras 10 (geração) e 1 (retificadora) do sistema;
  - **Variação dos ganhos do CCA**, variação dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador.

A Tabela 3.15 apresenta alguns parâmetros do sistema: o valor do *setpoint* para cada polo (lembre que são 4 polos), o valor dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador e os valores das reatâncias séries das linhas de transmissão da retificadora, da barra infinita e do compensador síncrono, respectivamente.

Tabela 3.15: Parâmetros predeterminados do sistema exemplo.

Parâmetro	Valor	Unidade
VSF (potência const.)	1565	MW/polo
VSF (corrente const.)	2610	A/polo
Kp (CCA)	102	pu
Ki (CCA)	2500	pu
Reatância LT B10-B1	0.255	%
Reatância LT B2-B20	0.781	%
Reatância LT B2-B3	0.938	%

Com ajuda do programa de análise de faltas simultâneas ANAFAS [35], obtém-se os níveis de curto-circuito trifásico para todas as barras, apresentado na Tabela 3.16. O cálculo é realizado utilizando o valor da reatância subtransitória de eixo direto ( $X''d$ ) das máquinas e desconsiderando os dispositivos *shunts* das barras de interface.

Tabela 3.16: Níveis de curto-circuito trifásico para o sistema exemplo.

Com estes valores, obtemos os seguintes SCRs:

$$SCR\ rec = 2.648$$

*SCR inv* = 2.517

### 3.2.1 Variação do *setpoint* do elo CCAT

A Figura 3.49 apresenta os autovalores do sistema para a variação gradativa do *setpoint* do elo. São indicados os autovalores correspondentes ao ponto de operação base associado aos parâmetros predeterminados da Tabela 3.15. O *setpoint* para este sistema é especificado em ampéres por ele estar em modo de controle de corrente constante.

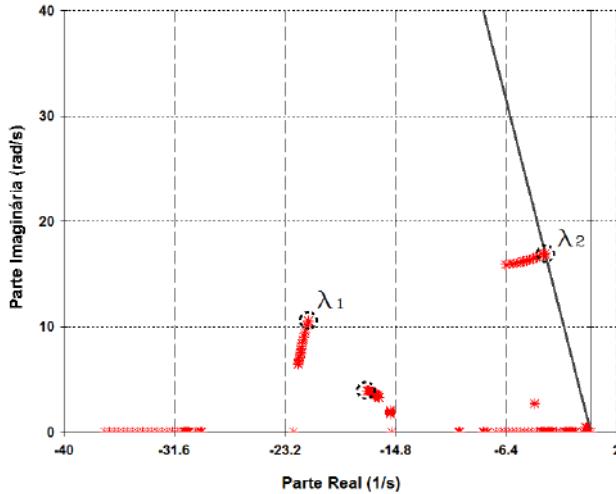


Figura 3.49: Lugar das raízes para a variação do *setpoint* do elo CCAT.

Observa-se que os autovalores indicados e associados ao caso base apresentam os posicionamentos menos favoráveis, ou seja, são os que têm menos amortecimento em relação aos seus correspondentes nos outros pontos de operação, em virtude destes representarem o maior *setpoint* possível no elo. Por conseguinte, qualquer outro ponto de operação com menor *setpoint* apresentará maiores amortecimentos, isto é, melhores posicionamentos.

A seguir são descritos os autovalores mais representativos deste sistema no ponto de operação base. O modo  $\lambda_2 = -3.46 \pm j16.95$  é do tipo eletromecânico, com frequência de oscilação 2.69 Hz e amortecimento de 20 %. O maior fator de participação corresponde a velocidade síncrona (WW) do compensador síncrono. Ressalta-se que, em comparação ao sistema anterior, o sistema possui somente um autovalor eletromecânico de interesse. Já o modo  $\lambda_1$  é próprio modo crítico, com valor de  $-21.47 \pm j10.53$  e frequência de oscilação de 1.67 Hz para o caso base. O modo crítico possui os mesmos fatores de participação que do sistema anterior, sendo eles: o primeiro "EQ" CS-3MQ (tensão subtransitória de eixo quadratura) e os quatro seguintes com DMCVMD03 (DMCV modelo do conversor do tipo MD03 (modelo número 3), conforme especificação no manual do ANATEM [30])

### 3.2.2 Variação da linha de transmissão LT B2-B20

Nesta simulação, como descrito anteriormente, varia-se a reatância série da linha de transmissão entre a barra inversora (B2) e a barra infinita (B20) do sistema, passando de um caso sem linha de transmissão até um caso com o máximo valor possível de reatância que permita a convergência do fluxo de potência.

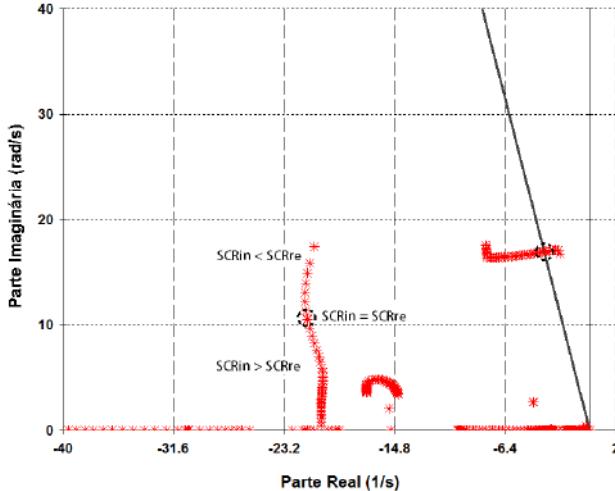


Figura 3.50: Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a inversora e Binf.

A Figura 3.50 apresenta o lugar das raízes para a simulação referida acima. Percebe-se que o ponto de operação base já não representa o pior caso, visto que, são simulados outros casos com reatâncias maiores. O aumento da reatância da linha, ou o aumento da impedância equivalente vista pelo inversor, representa a diminuição da capacidade de curto circuito na barra, afetando a relação de curto-circuito.

Pode-se dizer que o ponto de operação base, a grosso modo, representa um sistema com as barras de interface (inversora e retificadora) com o mesmo SCR, ou seja,  $SCR_{in}$  igual a  $SCR_{re}$ . Consequentemente, valores de reatância maiores que o predeterminado representam um  $SCR_{in}$  menor que  $SCR_{re}$ , e valores menores que o predeterminado um  $SCR_{in}$  maior que  $SCR_{re}$ .

A Figura 3.51 apresenta distintos traçados dos posicionamentos dos polos, estes correspondem a variação da quantidade de compensadores síncronos no sistema, sendo 3 CS para o vermelho (base), 2 CS para o cinza, 1 CS para o verde e sem compensador para o traçado azul, respectivamente.

Novamente percebe-se que com a diminuição da quantidade de compensadores síncronos, e consequente diminuição do SCR na barra de interface da inversora, os autovalores adquirem posições menos amortecidas. Cabe destacar o desaparecimento

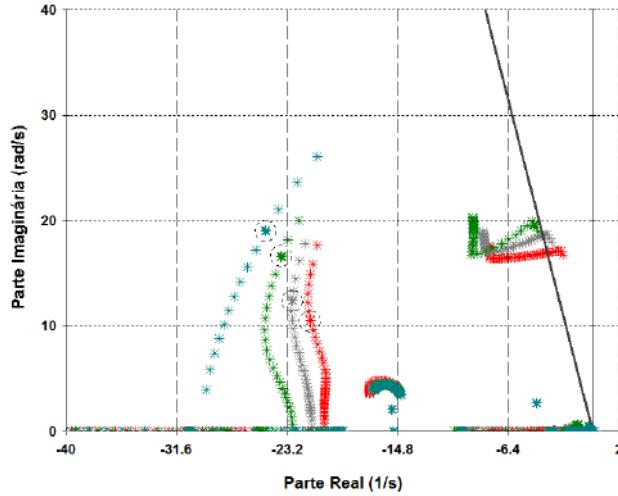


Figura 3.51: Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a inversora e Binf com diferentes quantidades de CS.

do modo eletromecânico para o sistema sem o compensador síncrono.

### 3.2.3 Variação da linha de transmissão LT B1-B10

De maneira a observar o efeito análogo, a seguir apresenta-se o aumento gradativo da reatância da linha de transmissão entre a geração e a barra de interface da retificadora.

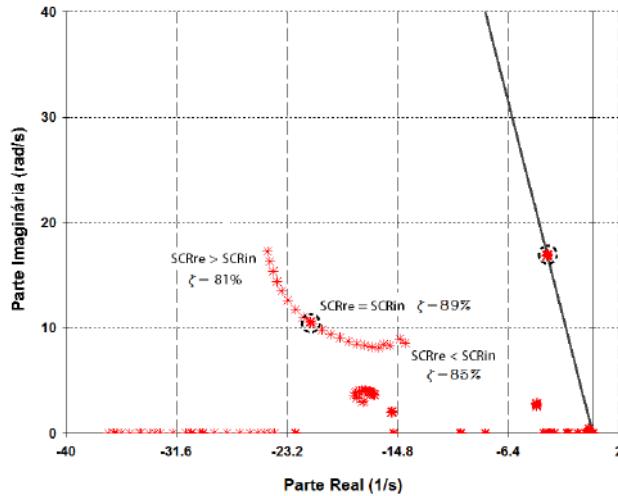


Figura 3.52: Lugar das raízes para a variação da reatância série da linha entre a geração e a retificadora.

A Figura 3.52 apresenta o lugar das raízes para a variação da reatância da linha entre a barra de geração (B10) e a barra de interface da retificadora (B1). Novamente

é apresentado o posicionamento do modo crítico para SCR<sub>re</sub> igual que SCR<sub>in</sub>, SCR<sub>re</sub> maior que SCR<sub>in</sub> e SCR<sub>re</sub> menor que SCR<sub>in</sub>. Desta vez, o posicionamento do modo crítico não pode ser retratado pela diminuição do seu amortecimento, visto que há uma variação tanto no valor real como no imaginário (frequência natural amortecida) o que resulta em valores próximos de amortecimento ( $\zeta$ ). Porém, o posicionamento do modo para uma simulação da variação da LT Binf com SCR<sub>re</sub> maior que SCR<sub>i</sub>, implicaria em mudanças mais abruptas entre pontos de operação e menos amortecidas das apresentadas nas Figuras 3.50 e 3.51. Observe que, na simulação o modo eletromecânico que corresponde ao compensador síncrono não apresentou nenhuma modificação.

### 3.2.4 Caracterização dos modos relacionados ao elo CCAT

O controle de polo do retificador constitui-se principalmente pelo regulador de corrente (CCA). A função de transferência adotada para o CCA, com o bloco proporcional e integral, é dado por  $CCA(s) = (Ki + s Kp)/s$ . A parametrização dos controladores, e especificamente destes dois parâmetros do elo CCAT, é realizada em função dos requerimentos do projeto, variando de um sistema para outro.

As Figuras 3.53 e 3.54 apresentam os *root-locus* para as variações dos parâmetros do CCA do sistema. O ganho K<sub>p</sub> do CCA é variado de 0 até 1020 pu, enquanto que o K<sub>i</sub> é variado de 0 até 10000 pu. Os valores predeterminados dos parâmetros estão expostos na Tabela 3.15. Da Figura 3.53 é possível observar dois autovalores complexos. O modo crítico é aquele que permanece no plano complexo com o aumento do ganho K<sub>p</sub>, enquanto que o outro modo entra no eixo tornando-se um autovalor real negativo para valores maiores ou iguais a  $K_p \approx 86$  pu. Para fins práticos, o novo autovalor é denominado modo crítico 2.

A variação do ganho K<sub>i</sub>, Figura 3.54, apresenta os mesmos autovalores complexos, porém com diferentes traçados. Observa-se que o modo crítico se manifesta como um autovalor complexo para valores de K<sub>i</sub> entre 0 e 7700 pu. Valores de ganhos maiores fazem com que o modo crítico se torne um autovalor real negativo. Enquanto que, o modo crítico 2 só se manifesta para ganhos maiores que 3300 pu.

A Tabela 3.17 apresenta os fatores de participação do modo crítico e do modo crítico 2 para o ganho K<sub>p</sub> do CCA do retificador igual a zero. Nesta condição, o modo crítico apresenta-se com as seguintes características:  $\lambda_{critico} = -6.85 \pm j54.158$ , frequência de oscilação 8.61 Hz, amortecimento 12.551 % e o parâmetro *DMCVMD03 # 1* como maior fator de participação.

A variável relacionada à modelagem do conversor (DMCV) número 3 (MD03) do retificador (#1) é o x0017, simbolizando o bloco avanço-atraso (LGLD - *Lead-Lag Block*) referente à função de transferência do CCA ( $CCA(s)$ ). Por conseguinte,

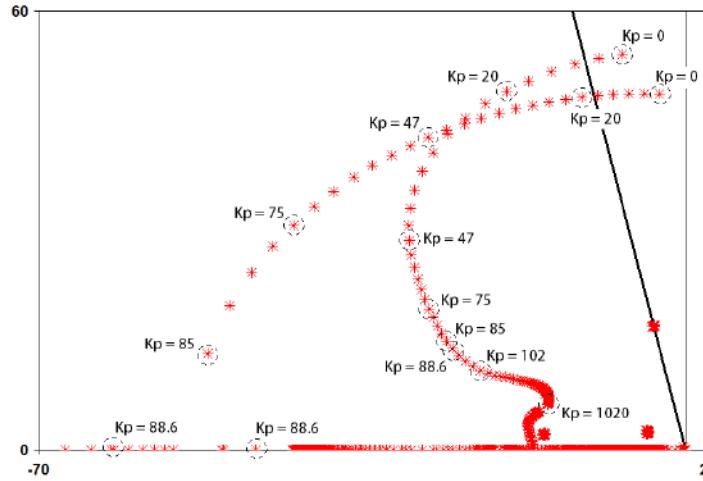


Figura 3.53: Lugar das raízes para a variação do ganho  $K_p$  do CCA do sistema exemplo.

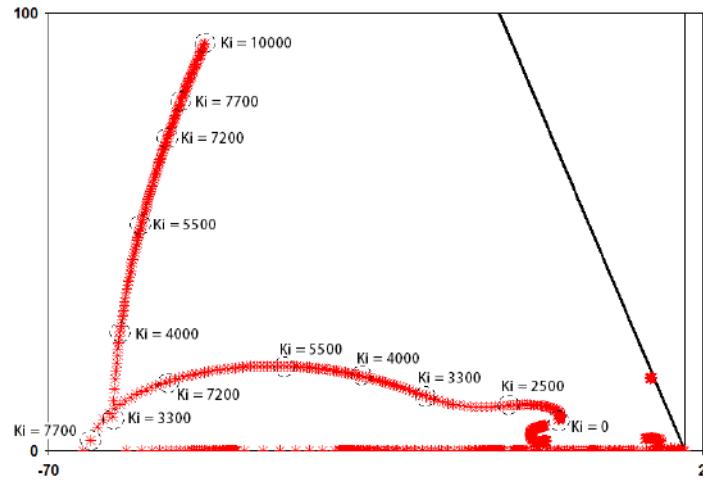


Figura 3.54: Lugar das raízes para a variação do ganho  $K_i$  do CCA do sistema exemplo.

pode-se denominar o modo crítico como sendo o **modo de controle de corrente** do retificador.

Já o modo crítico 2 apresenta as seguintes características:  $\lambda_{critico_2} = -2.8874 \pm j48.756$ , frequência de oscilação 7.75 Hz, amortecimento 5.9117 % e o parâmetro com maior fator de participação sendo  $DMCVMD03 \# 1$ . A despeito de que o modo crítico 2 possua o maior fator de participação idêntico ao modo de controle de corrente, o subsequente deve ser levado em consideração, visto que o seu módulo é relevante. O segundo fator corresponde ao conversor CA/CC (AC/DC Conv.) do inversor definido como número 2 (#2), com a corrente CC do conversor (IDC) sendo a variável relacionada. Esta sequência de fatores, com a modelagem do conversor e o próprio conversor CA/CC, repete-se até a oitava posição, mantendo-se sempre a

sequência e as mesmas variáveis, porém mudando as identificações correspondentes aos inversores no programa (#2, #6, #4 e #6), conforme Tabela 3.17.

Todos os quatro inversores que compõe o sistema CCAT são expostos, o que leva a determinar que o modo crítico 2 é também um modo de controle, porém relacionado aos conversores CA/CC inversores.

Tabela 3.17: Fatores de participação dos modos crítico e crítico 2 para o ganho  $K_p = 0$  pu do CCA.

Modo crítico				Modo Crítico 2			
Módulo	Fase	Parâmetro	Variável	Módulo	Fase	Parâmetro	Variável
1.000	-1.59E-15	DMCVMD03 # 1	x 0017	1.000	-3.18E-15	DMCVMD03 # 1	x 0017
1.000	-1.19E-10	DMCVMD03 # 1	x 0017	0.993	11.596	AC/DC Conv. # 2	IDC
1.000	-9.27E-10	DMCVMD03 # 1	x 0017	0.711	-11.107	DMCVMD03 # 1	x 0017
1.000	-3.24E-10	DMCVMD03 # 1	x 0017	0.706	0.489	AC/DC Conv. # 6	IDC
0.684	19.442	AC/DC Conv. # 2	IDC	0.578	79.219	DMCVMD03 # 1	x 0017
0.684	19.442	AC/DC Conv. # 6	IDC	0.573	90.814	AC/DC Conv. # 4	IDC
0.684	19.442	AC/DC Conv. # 4	IDC	0.138	62.705	DMCVMD03 # 1	x 0017
0.684	19.442	AC/DC Conv. # 8	IDC	0.137	74.300	AC/DC Conv. # 8	IDC
0.234	-97.266	DMCVMD03 # 2	x 0303	0.083	88.628	DMCVMD03 # 1	x 0018
0.234	-97.266	DMCVMD03 # 2	x 0303	0.059	77.521	DMCVMD03 # 1	x 0018
0.234	-97.266	DMCVMD03 # 2	x 0303	0.048	167.850	DMCVMD03 # 1	x 0018
0.234	-97.266	DMCVMD03 # 2	x 0303	0.012	151.330	DMCVMD03 # 1	x 0018
0.134	-131.810	CS-3MQ # 3	EQ”	0.001	-136.590	DMCVMD03 # 1	x 0007
0.115	160.340	IPU9MQ # 10	EQ”	0.001	-121.430	DMCVMD03 # 1	x 0010

Cabe ressaltar que após a constatação da existência deste outro autovalor, isto é, do modo crítico 2, novas simulações foram realizadas no sistema predecessor, obtendo-se resultados equivalentes e, portanto, omitidos neste trabalho. Mesmo caracterizado como um autovalor complexo unicamente para ganhos em faixas específicas, ou seja, para valores do ganho  $K_p$  menores e para valores de  $K_i$  maiores que um certo valor, deve ser levado em consideração nos ajustes dos controladores do elo CCAT, tendo potencial de tornar o sistema instável com a inserção de outro modo oscilação. Este é o caso do próximo sistema estudado. Independentemente dele não ser instável, o modo crítico 2 manifesta-se em razão dos ajustes empregados no sistema. Salienta-se que tais ajustes provenientes do caso original da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) não foram modificados.

### 3.3 Rio Madeira - A opção híbrida

Para os estudos relativos aos grandes aproveitamentos hidrelétricos na região Amazônica, no caso específico do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, no que diz respeito ao sistema de transmissão para a integração das usinas de Santo Antônio e Jirau à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram analisadas várias alternativas para diferentes tecnologias de transmissão, entre elas a opção: puramente CC, com dois bipolos  $\pm 600\text{ kV}$  e 3150 MW cada; puramente AC, com três circuitos em 765 kV, 70 % de compensação série e seis feixes por fase; e por último a opção híbrida, descrita a seguir.

Na alternativa híbrida o escoamento para o Sudeste seria realizada da seguinte maneira: cerca de 50% da potência utilizando tecnologia CC (1 bipolar  $\pm 600$  kV de 3150 MW) e 50% em corrente alternada (2 LTs de 500 kV, circuito simples, compensadas em 70%), conforme apresentado na Figura 3.55.

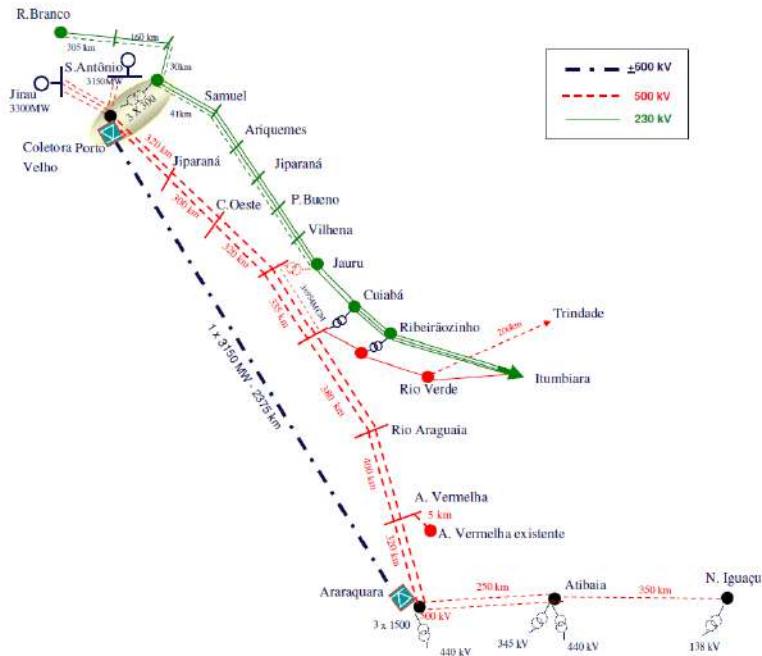


Figura 3.55: Alternativa de transmissão híbrida. Fonte: [1].

Nos estudos realizados pela EPE para a análise da opção híbrida, foram utilizados sistemas equivalentes, disponíveis em [36], a partir dos quais foram montados os casos de simulação para as análises subsequentes deste trabalho. Dos materiais disponibilizados, dois sistemas híbridos chamaram atenção para estes estudos. O primeiro sistema é mais completo, apresentando 88 máquinas e o elo CC. Já o segundo sistema é um modelo equivalente, que representa o sistema anterior, de maneira simplificada. Este último, contém apenas 8 máquinas e é modelado sem a presença do elo CC, que por sua vez é representado por injeções de potência (ativa e

reativa). Devido às limitações dos programas de simulação, na versão acadêmica, foi escolhido o segundo modelo citado, inserindo o elo CC do primeiro. A Figura 3.56 apresenta o diagrama unifilar do sistema híbrido equivalente, contendo a transmissão CA em paralelo com a transmissão CC.

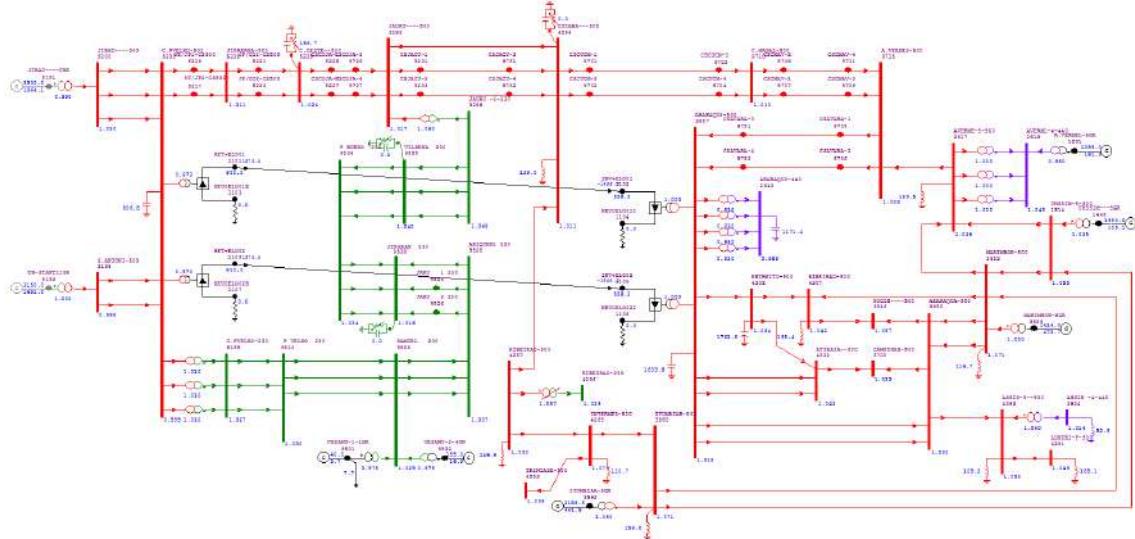


Figura 3.56: Diagrama unifilar do sistema híbrido do Rio Madeira.

A partir desta topologia base foram criadas outras, tendo em vista o sistema de transmissão entre a SE de Porto Velho e Araraquara. Primeiramente é realizada uma duplicação do sistema CC e, em seguida, um aumento da quantidade de circuitos CA de 500 kV em paralelo. Estas modificações são realizadas com o objetivo de pesquisar, do ponto de vista da teoria de pequenos sinais, sistemas CC fortes em paralelo com sistemas CA fracos, e vice-versa.

As simulações correspondem a:

- Rio Madeira Híbrida - caso base;
  - Rio Madeira Híbrida - 2 bipolos;
  - Rio Madeira Híbrida - 3 circuitos AC 500 kV;
  - Rio Madeira Híbrida - 4 circuitos AC 500 kV.

Nenhuma outra alteração além das mencionadas acima é realizada no equivalente, ou seja, conservou-se o sistema como definido nos arquivos históricos deste, por exemplo: uma barra definida como *slack* é mantida com essa configuração.

### 3.3.1 Sistema Híbrido

O caso base é o próprio sistema equivalente anteriormente mencionado. Do ponto de vista dinâmico, o sistema possui 8 gerações, com os seus sistemas de controle per-

tinentes; dois compensadores estáticos de reativos (CER) no sistema de transmissão CA 500 kV, dinâmicas não representadas; e um bipolo, representado pelo modelo *built-in* do ANATEM.

Neste sistema e nos subsequentes, nenhum barramento infinito é empregado. Vale ressaltar que nos estudos mencionados no começo da seção, tanto para a alternativa CC e a HB, não foram especificados compensadores síncronos na barra de interface da inversora - evidenciando um alto SCR neste ponto.

A Tabela 3.18 apresentada alguns dos autovalores do sistema equivalente para o ponto de operação base (com 1575 MW/pólo). Por ser um sistema bem mais complexo que os anteriores a quantidade de polos é maior, sendo indicados os 7 polos eletromecânicos em negrito e os dois polos referentes ao elo CCAT em vermelho. O polo 21 corresponde ao modo de controle de corrente (modo crítico  $\lambda_1$ ), enquanto que o polo 33 é o referido como modo crítico 2 ( $\lambda_2$ ), abordados mais a frente em detalhes.

Com o ponto de operação base e o mesmo procedimento empregado no primeiro sistema, cria-se novamente os 23 pontos de operação, tendo como única variação a potência ativa transmitida pelo elo CCAT.

Tabela 3.18: Autovalores para o ponto de operação base do sistema híbrido do Rio Madeira.

N	Real	Imaginário	Módulo	Freq. [Hz]	Amort. [%]	Fator de participação
1	<b>-0.616</b>	<b>5.000</b>	<b>5.038</b>	<b>0.796</b>	<b>12.23</b>	<b>WW JIRAU-UHE# 5191</b>
3	<b>-1.045</b>	<b>7.818</b>	<b>7.888</b>	<b>1.244</b>	<b>13.25</b>	<b>DELT UHSAMU-1-1GR# 9501</b>
5	<b>-0.984</b>	<b>7.273</b>	<b>7.339</b>	<b>1.158</b>	<b>13.41</b>	<b>DELT UHSAMU-2-4GR# 9502</b>
7	-0.063	0.377	0.383	0.060	16.49	ES_ITUMB_GER# 178
9	-1.062	5.894	5.989	0.938	17.72	RV_S.ANTONIO# 1158
11	-2.446	12.132	12.376	1.931	19.77	EQ' ITUMBIAR-5GR# 3592
13	<b>-2.369</b>	<b>9.604</b>	<b>9.891</b>	<b>1.528</b>	<b>23.95</b>	<b>DELT A.VERMEL-6GR# 1001</b>
15	-1.793	6.051	6.312	0.963	28.42	RV_JIRAU # 1159
17	-1.793	6.051	6.312	0.963	28.42	RV_S.ANTONIO# 1158
19	<b>-2.579</b>	<b>6.835</b>	<b>7.305</b>	<b>1.088</b>	<b>35.30</b>	<b>WW UHSSIM—5GR# 1445</b>
21	<b>-14.188</b>	<b>34.734</b>	<b>37.520</b>	<b>5.528</b>	<b>37.82</b>	<b>IDC AC/DC Conv. # 124</b>
23	<b>-0.604</b>	<b>1.430</b>	<b>1.553</b>	<b>0.228</b>	<b>38.93</b>	<b>WW ITUMBIAR-5GR# 3592</b>
25	-3.870	9.116	9.903	1.451	39.08	EQ' MARIMBON-8GR# 3588
27	<b>-6.524</b>	<b>10.093</b>	<b>12.018</b>	<b>1.606</b>	<b>54.29</b>	<b>WW JIRAU-UHE# 5191</b>
29	-5.510	8.306	9.967	1.322	55.28	EQ' MARIMBON-8GR# 3588
31	-3.987	4.878	6.300	0.776	63.29	ES_S.SIMAO # 374
33	<b>-27.619</b>	<b>33.506</b>	<b>43.422</b>	<b>5.333</b>	<b>63.61</b>	<b>IDC AC/DC Conv. # 122</b>
35	-0.786	0.829	1.142	0.132	68.80	EQ' MARIMBON-8GR# 3588

A Figura 3.57 apresenta o posicionamento dos autovalores do sistema para a variação do ponto de operação, indicando em cor vermelha os correspondentes ao ponto de operação base. Observa-se uma variação mínima do modo crítico, enquanto que, o modo crítico 2 tende a aumentar o seu amortecimento com o aumento da potência. O sistema permanece estável do ponto de vista de pequenas perturbações,

tendo de ser corroborada com uma análise não-linear no domínio do tempo, omitido neste trabalho.

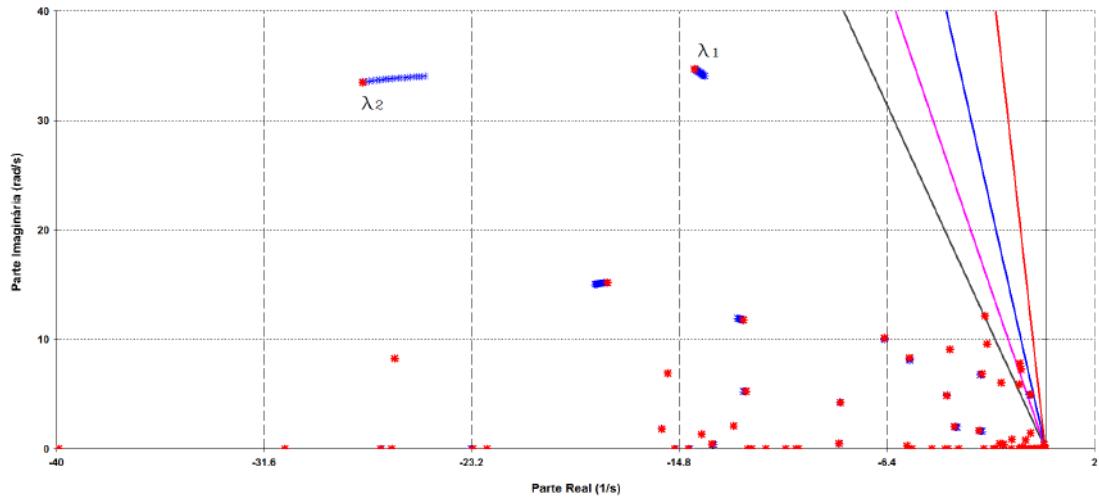


Figura 3.57: Lugar das raízes para a variação dos pontos de operação do sistema híbrido do Rio Madeira.

### 3.3.2 Sistema Híbrido - modificações

Alguns artigos, especificamente [10], descrevem que sistemas CC podem ser responsáveis por instabilidades de tensão ou angular quando operados em paralelo com uma transmissão CA. E que esta tendência intensifica-se para sistemas CA mais fortes.

Para tentar corroborar esta ideia do ponto de vista de pequenos sinais, realiza-se as seguintes simulações alterando a topologia do sistema híbrido, com seus procedimentos de elaboração resumidos para fins práticos. Primeiramente, realiza-se a simulação com a inserção de um segundo bipolo homólogo ao existente (necessidade de aumento da quantidade de máquinas e de geração próximo à retificadora, aumento de carga e compensação reativa nas proximidades da inversora) e, a seguir, um aumento da quantidade de circuitos CA de 500 kV em paralelo a partir topologia base.

A Figura 3.58 apresenta a comparação entre variação do posicionamento dos autovalores do sistema com um bipolo e dois bipolos. Como era esperado, a inserção do bipolo tem um efeito negativo sob o modo crítico, situando-o com um menor amortecimento para os pontos de operação analisados. O efeito inverso pode ser observado na simulação do posicionamento do modo crítico para a ausência de um bipolo, Figura 3.18e. Enquanto que, o modo crítico 2 tem um aumento no seu amortecimento.

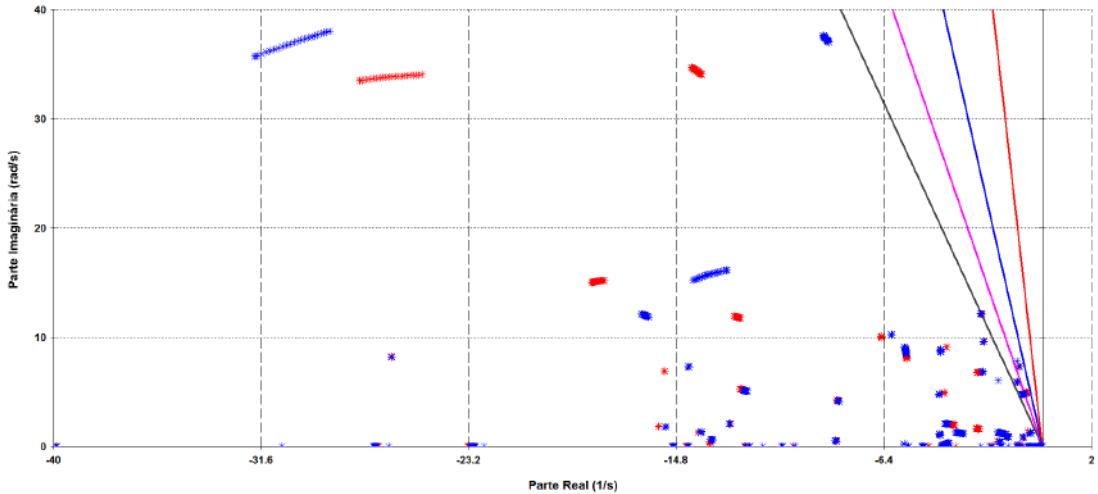


Figura 3.58: Lugar das raízes dos pontos de operação do sistema híbrido equivalente (vermelho) e para inserção do bipolo homólogo (azul).

A Figura 3.59 apresenta uma comparação da variação dos posicionamentos dos autovalores do sistema equivalente, do sistema com a inserção de um circuito e com dois circuitos CA de 500 kV. Observa-se que o modo crítico não apresenta nenhuma variação com relação ao caso base, situando-se sempre na mesma posição em cada ponto de operação. Já o modo crítico 2, apresenta um posicionamento menos amortecido para o aumento dos circuitos CA em paralelo.

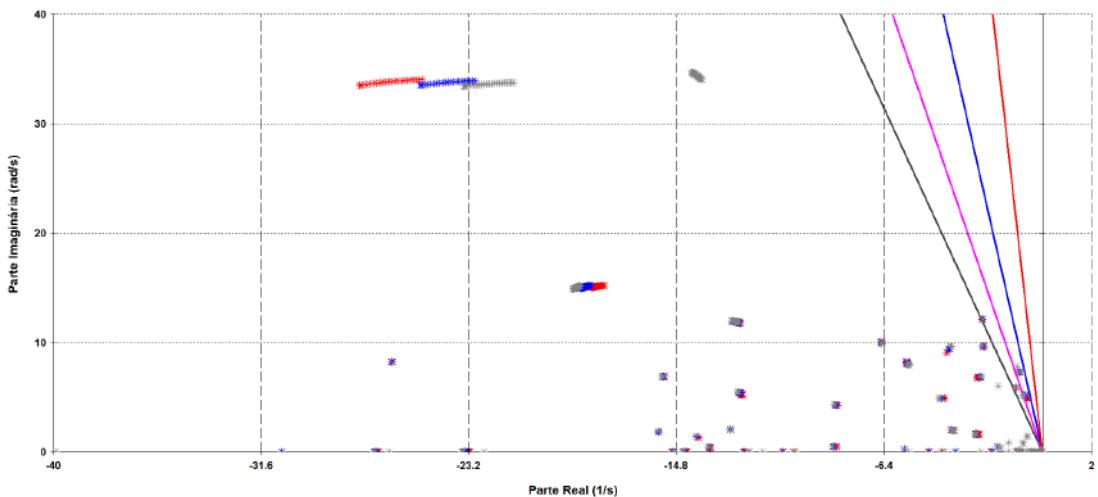


Figura 3.59: Lugar das raízes para a variação dos pontos de operação do sistema equivalente (vermelho) e para adição de um (azul) e dois (cinza) circuitos AC de 500 kV.

### 3.3.3 Análise dos modos relacionados ao elo CCAT

No sistema anterior, o caso exemplo, observa-se o modo crítico e o modo crítico 2 para ganhos com valores em faixas específicas. Assim sendo, são realizados novas simulações de *root-locus* dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador para o sistema equivalente.

É relevante salientar que foram vários os arquivos dinâmicos obtidos da base de dados, tendo duas ou três opções de combinações possíveis para os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador. A Tabela 3.19 apresenta a opção escolhida e empregada nas simulações para este sistema.

Tabela 3.19: Parâmetros predeterminados do CCA do retificador para o sistema híbrido equivalente.

Parâmetro	Valor	Unidade
$K_p$	120	pu
$K_i$	6500	pu

A Figura 3.60 apresenta o *root-locus* para a variação do ganho  $K_p$  do CCA do retificador do sistema híbrido. O ganho  $K_p$  é variado de 0 até 360. Novamente os dois modos correspondentes ao elo CCAT tendem a aumentar seu amortecimento para o aumento deste ganho. Porém, é necessário um maior ganho para converter o modo crítico 2 em um autovalor real negativo. Outra diferença com o sistema exemplo, onde o modo crítico permanecia no plano complexo, é que no sistema híbrido o modo entra no eixo real para valores maiores que  $K_p = 315$  pu.

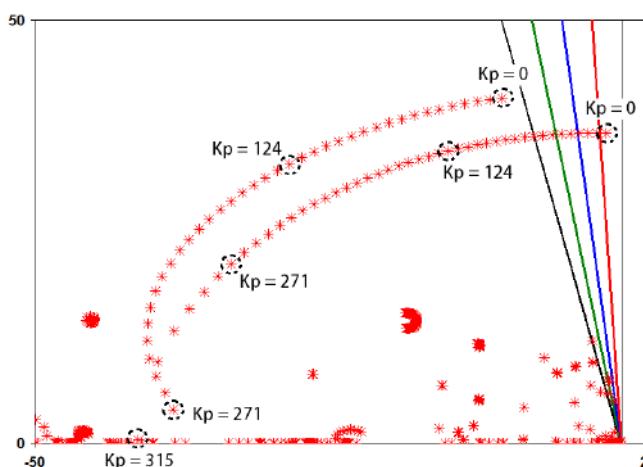


Figura 3.60: Lugar das raízes para a variação do ganho  $K_p$  do CCA do sistema híbrido.

A variação do ganho  $K_i$ , apresentado na Figura 3.61, exibi-se bem distinto que

no caso do sistema exemplo. Observa-se que o modo crítico 2 deixa o eixo real para um valor menor que do caso anterior, para  $K_i = 954$  pu. Por sua vez, o modo crítico também deixa o eixo real em algum ponto, porém só é possível identificar claramente para um valor de  $K_i = 1392$  pu.

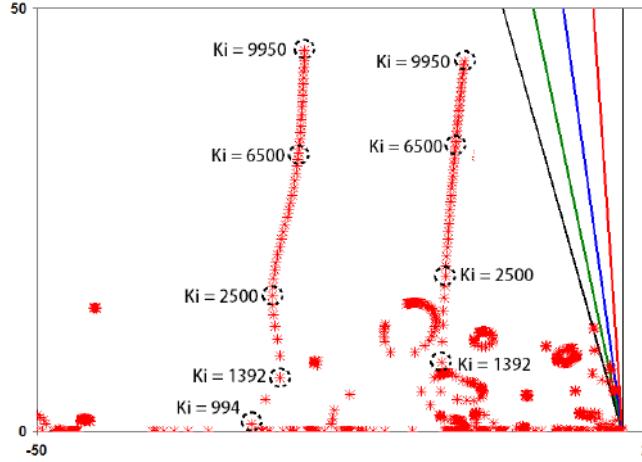


Figura 3.61: Lugar das raízes para a variação do ganho  $K_i$  do CCA do sistema híbrido.

A Tabela 3.20 apresenta os fatores de participação dos modos crítico e crítico 2 do sistema híbrido para o ganho  $K_p$  do CCA do retificador igual a zero. Por conseguinte, empregando o mesmo raciocínio do sistema exemplo, infere-se que os modos  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os próprios modos de controle de corrente do retificador (ou modo crítico) e o modo crítico 2, respectivamente.

Tabela 3.20: Fatores de participação dos modos crítico e crítico 2 para o ganho  $K_p = 0$  pu do CCA.

Modo crítico				Modo Crítico 2			
Módulo	Fase	Parâmetro	Variável	Módulo	Fase	Parâmetro	Variável
1.000	-3.18E-15	DMCVMD03 #101	x 0017	1.000	0.000	AC/DC Conv. #122	IDC
1.000	-6.40E-09	DMCVMD03 #101	x 0017	1.000	-3.75E-12	AC/DC Conv. #124	IDC
0.984	8.210	AC/DC Conv. #122	IDC	0.964	-20.294	DMCVMD03 #101	x 0017
0.984	8.210	AC/DC Conv. #124	IDC	0.964	-20.294	DMCVMD03 #101	x 0017
0.051	89.053	DMCVMD03 #101	x 0018	0.366	111.440	UH-STANT #5192	EQ"
0.051	89.053	DMCVMD03 #101	x 0018	0.279	173.230	JIRAU-UHE #5191	EQ"
0.017	-34.394	DMCVMD03 #101	x 0007	0.246	79.898	ES_S.ANTO #1188	x 0004
0.017	-34.394	DMCVMD03 #101	x 0007	0.244	27.573	UH-STANT #5192	EQ'
0.006	35.670	DMCVMD03 #101	x 0009	0.223	146.020	ES_JIRAU #1189	x 0004
0.006	35.670	DMCVMD03 #101	x 0010	0.211	-99.738	ES_S.ANTO #1188	x 0016
0.006	35.670	DMCVMD03 #101	x 0010	0.211	-99.738	ES_S.ANTO #1188	x 0017
0.006	35.670	DMCVMD03 #101	x 0009	0.198	87.677	JIRAU-UHE #5191	EQ'

Os *root-locus* dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador, podem apresentar um traçado totalmente distinto ao apresentado nas Figuras 3.60 e 3.61. Este é o caso

apresentado a seguir, empregando um  $K_i$  fixo em 2500 pu e traçando o *root-locus* para o  $K_p$  de CCA novamente, conforme Figura 3.62.

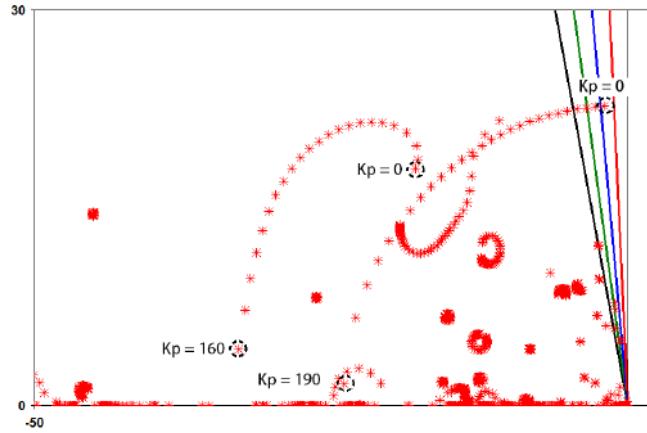


Figura 3.62: Lugar das raízes para a variação do ganho  $K_p$  do CCA do sistema híbrido -  $K_i = 2500$  pu.

Simulações de *root-locus* empregando outros parâmetros do modelo do elo CCAT a pequenos sinais para a obtenção do traçado no plano complexo foram realizadas, porém nenhuma delas apresentou variações consideráveis aos traçados apresentados acima ou que poderiam ser consideradas como aceitáveis, por exemplo, a variação da constante de tempo do VCO ( $T_{vco}$ ) não deveria ser admitida, por estar restringida a um valor de tempo da ordem de milissegundos (uma variação elevada apresentaria um posicionamento totalmente distinto).

Em comparação aos dois sistemas anteriores, que não exibem o modo crítico 2 nas simulações do lugar das raízes para o aumento da potência transmitida pelo elo CCAT, Figuras 3.5 e 3.49, o sistema híbrido apresenta o modo para a simulação referida, Figura 3.57. Tal fato, acarretou a investigação dos fatores que influenciam o aparecimento deste modo no sistema híbrido.

Um dos fatores, como descrito anteriormente para o sistema exemplo na seção 3.2.4, é que o modo é caracterizado como um autovalor complexo para ganhos de  $K_p$  e  $K_i$  em certas faixas de valores. Porém, a partir das simulações no sistema híbrido, Figuras 3.60 e 3.61, é possível observar que as faixas de valores para o aparecimento mudaram.

A Figura 3.63 apresenta o lugar das raízes para a variação do comprimento da linha CC do sistema híbrido, isto é, para o aumento gradativo dos parâmetros série ( $R$  e  $X$ ) da linha de transmissão CC. Ainda, no mesmo gráfico, são apresentados o lugar das raízes para os parâmetros predeterminados do sistema híbrido (azul -  $Z = 15.85 + 2.8185 \Omega$ ) e utilizando os dados da linha CC de Itaipu (verde -  $Z = 10.47 + 1.2319 \Omega$ ). A simulação é realizada variando concomitantemente a

resistência de 0.01 a  $25 \Omega$  e a reatância de 0 a  $4000 \text{ mH}$  das duas linhas de transmissão do bipolo.

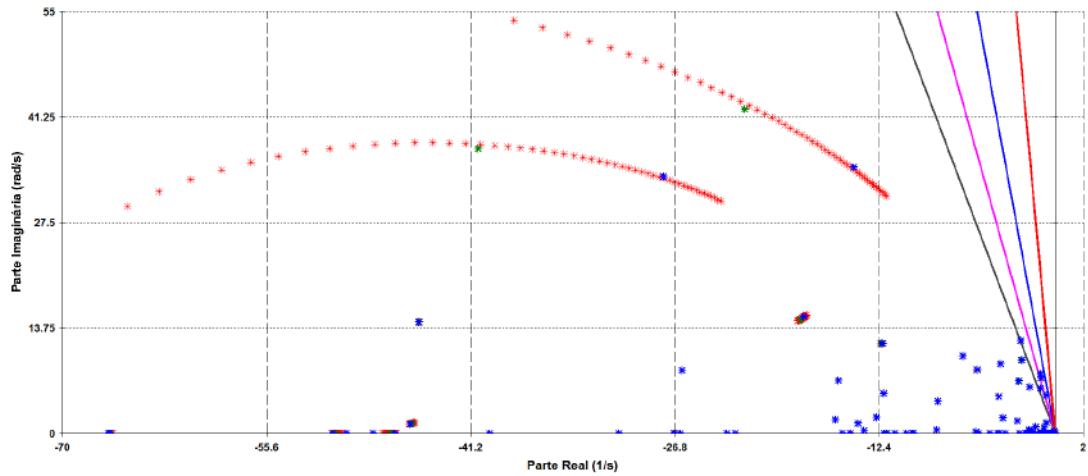


Figura 3.63: Lugar das raízes para a variação do comprimento da linha CC do sistema híbrido.

Verifica-se que tanto o modo crítico quanto o modo crítico 2 são fortemente influenciados pelo comprimento da linha CC, tendo seus amortecimentos e frequências de oscilação reduzidos. No entanto, a influência no modo crítico 2 é maior.

Esta influência do comprimento de linha pode também ser verificada com um novo traçado do *root-locus* para a variação do  $K_i$  do CCA do retificador do sistema híbrido com os dados de linha CC do sistema de Itaipu. A Figura 3.64 apresenta a comparação do *root-locus* do sistema híbrido com os dados predeterminados (ver-

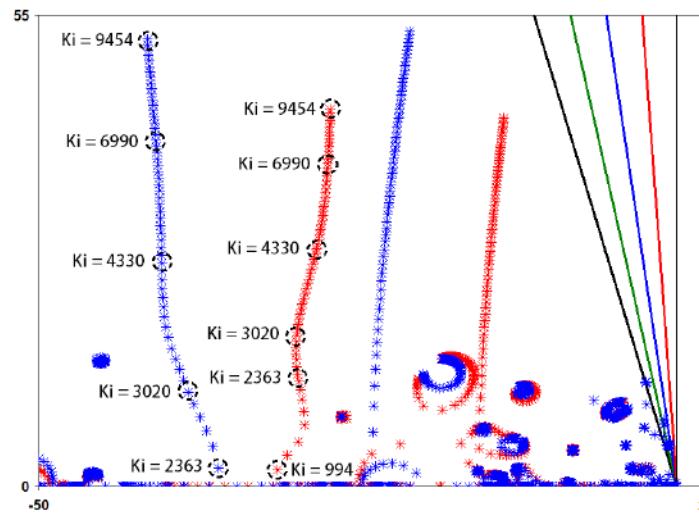


Figura 3.64: Comparaçāo do lugar das raízes para a variação do ganho  $K_i$  do CCA do sistema híbrido.

melho) e com dados de linha de Itaipu (azul).

Observe que para o caso com a linha predeterminada o sistema apresenta o modo crítico 2 para valores de Ki maiores que 994 pu. Enquanto que, para o caso com a linha de Itaipu apresenta o modo crítico 2 para valores de Ki maiores que 2363 pu. Constituindo-se assim como um outro fator que influencia o aparecimento deste modo no sistema híbrido

Por conseguinte, a presença deste modo como um autovalor complexo está sujeito a uma combinação de valores de ganho Ki do CCA elevados com linhas de transmissão CC longas e, em menor grau, a valores de Kp do CCA reduzidos.

# Capítulo 4

## Considerações Finais

O presente trabalho de dissertação apresentou uma abordagem de sistemas de transmissão de corrente contínua em paralelo com sistemas de corrente alternada, sob a perspectiva da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência. No Brasil, elos de CCAT têm sido tradicionalmente construídos como interconexões assíncronas. No entanto, com a entrada em operação dos bipolos associados ao complexo Belo Monte em paralelo com o sistema, situações como as analisadas neste trabalho poderiam ocorrer no SIN.

Situações nas quais, por questões operativas, a relação de curto-circuito na barra de interface da inversora se vê reduzida para valores abaixo do especificado no projeto, pequenas perturbações como um simples aumento de carga poderia ocasionar oscilações crescentes ou sustentadas no tempo, desencadeando uma instabilidade de tensão.

Os resultados obtidos, a partir do cálculo dos autovalores dos três sistemas apresentados, mostram a existência de dois modos de oscilação associados ao elo CCAT. A natureza destes modos é revelado pelo cálculo dos seus fatores de participação. O primeiro modo, referido como modo crítico, é encontrado na literatura [17] e denominado modo de controle de corrente. Já o segundo modo, referido como modo crítico 2 neste trabalho, pode ser caracterizado como um autovalor complexo principalmente nas seguintes condições: a primeira, em sistemas com linhas CC longas e valores de  $K_p$  ou  $K_i$  do CCA do retificador em certas faixas de valores; e a segunda somente para uma dada associação entre  $K_p$  e  $K_i$  do CCA do retificador.

Da ótica da análise dos autovalores, caso o elo CCAT esteja conectado a um sistema fraco, um aumento da potência transmitida nos bipolos instabiliza o sistema, com o modo de controle de corrente passando para o semiplano direito. Entretanto, a robustez do sistema de controle do elo CCAT se impõe perante este modo de oscilação, encontrando pontos de operação estáveis na vizinhança do ponto de bifurcação de Hopf.

O resultado do lugar das raízes desenvolvido com o aumento da potência foi

validado com simulações lineares e não-lineares no domínio do tempo. As análises preliminares do desempenho dinâmico não-linear do sistema não apresentaram as oscilações correspondentes ao modo crítico, enquanto que as análises lineares apresentaram. Levando a uma análise mais aprofundada dos controles do elo CCAT.

Inibindo a atuação de uma malha auxiliar do controle dos inversores, especificamente do controle de erro de corrente (CEC), um processo de instabilidade de tensão é originado para os casos onde o ponto de operação posiciona o modo crítico no semiplano direito, resultando em sucessivas falhas de comutação e recomposições do sistema. Outro elemento chave na determinação deste tipo de instabilidade, é o maior fator de participação do modo crítico no PO 9, correspondendo à tensão subtransitória de eixo quadratura do compensador síncrono.

Com base nos resultados, conclui-se que a redução da potência de curto-circuito da barra de interface da inversora, implica a redução do SCR, o que leva a redução da margem de estabilidade por bifurcações de Hopf em sistemas contendo elos de CCAT. Um efeito análogo é estabelecido quando é aumentado o SCR da barra retificadora. Ao contrário, um aumento do SCR da inversora e uma diminuição do SCR da retificadora, implicam em um aumento da margem de estabilidade devido ao modo crítico.

Em [16] menciona-se que é possível determinar o tipo de bifurcação de Hopf, no que respeita a se este é do tipo supercrítico ou subcrítico, com programas de estabilidade transitória. Diversas simulações no ponto de bifurcação com distintos distúrbios para o sistema base com o modelo completo do controle do elo CCAT e no caso da inibição do CEC não resultaram frutíferas. Porém, com a inibição do CEC e do VDCOL conjuntamente, o sistema perde a estabilidade para uma perturbação suficientemente grande, mas recupera o equilíbrio para uma perturbação suficientemente pequena, implicando em um ciclo limite instável em torno de um ponto de operação estável. Por conseguinte, a bifurcação de Hopf possui um comportamento subcrítico.

Cabe destacar que, o posicionamento do modo crítico é mais influenciado pelas relações de curto-circuito das barras de interface da retificadora e da inversora, do que por outro parâmetro do sistema. Para a mesma relação de curto-circuito nos terminais, o aumento da quantidade de circuitos CA em paralelo com o elo, não representa nenhuma alteração significativa do ponto de vista dos autovalores do sistema. No entanto, o aumento da quantidade de bipolos representa uma diminuição da margem de estabilidade devido ao modo crítico, implicando em uma diminuição do SCR das barras de interface do elo CCAT.

Ressalta-se que a literatura consultada [6, 16] expõe um terceiro modo de oscilação, devido ao controlador de potência do elo, com a característica de ser um autovalor real negativo. Os autores associam o colapso de tensão em sistemas com

elos CCAT ao cruzamento deste autovalor para o semiplano direito do plano complexo, resultando em uma bifurcação Sela-Nó e uma instabilidade aperiódica.

É importante salientar que o modo crítico identificado nas análises realizadas nesta dissertação está próximo aos limites de validade dos modelos utilizados. Entretanto, acredita-se que as análises realizadas e os resultados obtidos são úteis para um maior conhecimento de sistemas CA e CC paralelos, no que tange a análise modal. Posto isso, apresenta-se uma das limitações da análise a pequenas perturbações (modelagem eletromecânica), ou seja, a limitação quanto aos modos de alta frequência. Na prática, o modo crítico será amortecido pelo CEC, como demonstrado nas simulações não-lineares no domínio do tempo. Este controle, assim como outros blocos de controle do elo são omitidos a pequenos sinais por representarem blocos do sistema no limite da linearização ou por serem blocos descontínuos [37]. Por conseguinte, representam uma segunda limitação deste tipo de análise.

## Trabalhos futuros

- Tendo como limitação as dinâmicas de alta frequência na análise modal, faz-se necessário simulações de transitórios eletromagnéticos EMTP/ATP ou PS-CAD/EMTDC, de maneira a validar o modo crítico.
- A fim de determinar condições operativas desfavoráveis do ponto de vista a pequenos sinais, seria interessante a simulação dos autovalores do sistema de Belo Monte em paralelo com o sistema CA do SIN, assim como uma outra simulação incluindo ao cenário de Belo Monte os elos de Itaipu e Madeira, considerando a condição futura *multi-infeed* do sistema brasileiro.
- Uma análise detalhada com simulações não-lineares no domínio do tempo do sistema base para pontos de bifurcação de Hopf distintos, destacando a atuação dos diversos controles do elo CCAT do modelo *built-in* do ANATEM. De maneira a caracterizar e padronizar a instabilidade de tensão apresentada neste trabalho.
- Utilização de programas especializados para o caso de sistemas elétricos de potência onde aparece os problemas de cálculo de fronteiras de bifurcação de Hopf (*Boundary Value Problem*), permitindo uma determinação exata do tipo de ciclo limite desenvolvido pela bifurcação encontrado no presente trabalho.

# Referências Bibliográficas

- [1] EPE. *Estudos Relativos Aos Grandes Aproveitamentos Hidrelétricos na Região Amazônica - Análise do sistema de integração dos aproveitamentos hidrelétricos do rio Madeira e reforços no SIN*. Relatório r1 - detalhamento das alternativas, mar. 2008. EPE-DEE-RE-055/2008-r0.
- [2] EPE. *Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão - Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste*. Relatório r1 - análise técnico-econômica das alternativas, ago. 2011. EPE-DEE-RE-040/2011-r0.
- [3] ONS. *Procedimentos de Rede - Requisitos mínimos para elos de corrente contínua*. Submódulo 2.5, 2016.
- [4] ONS. *Procedimentos de Rede - Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. Submódulo 23.3, 2016.
- [5] KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., et al. “Definition and classification of power system stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, ago. 2004. doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981. IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions.
- [6] PADIYAR, K., RAO, S. S. “Dynamic analysis of voltage instability in AC-DC systems”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, , n. 1, 1996.
- [7] CRESAP, R. L., MITTELSTADT, W. A. “Small-signal modulation of the Pacific HVDC intertie”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1976. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/T-PAS.1976.32133.
- [8] NGAMROO, I. “A Stabilization of frequency oscillation in a parallel ac-dc interconnected power system via an HVDC Link”, *Science Asia*, 2002.
- [9] NOHARA, A. A. *Influência da Modulação de Potência de Elos de Transmissão em Corrente Contínua na Estabilidade de Frequência e no Amortecimento de Modos Interáreas*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

- [10] HAMMAD, A. E. “Stability and control of HVDC and AC transmissions in parallel”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/61.796252.
- [11] TO, K. W. V., DAVID, A. K., HAMMAD, A. E. “A robust co-ordinated control scheme for HVDC transmission with parallel AC systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/61.311190.
- [12] HAMMAD, A. E., KUHN, W. “A Computation Algorithm for Assessing Voltage Stability at AC/DC Interconnections”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1986. ISSN: 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.1986.4334872.
- [13] NAYAK, O. B., GOLE, A. M., CHAPMAN, D. G., et al. “Control sensitivity indices for stability analysis of HVDC systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/61.473343.
- [14] CIGRE, IEEE. *Guide fog Planning DC Links Terminating at AC System Locations Having Low Short-Circuit Capacities*. Relatório técnico, jun. 1992. Part I: AC/DC Interaction Phenomena.
- [15] PILOTTO, L. A. S., SZECHTMAN, M., HAMMAD, A. E. “Transient AC voltage related phenomena for HVDC schemes connected to weak AC systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/61.141857.
- [16] AIK, D. L. H., ANDERSSON, G. “Nonlinear dynamics in HVDC systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/61.796236.
- [17] PILOTTO, L. A. S., ALVES, J. E. R., WATANABE, E. H. “High frequency eigenanalysis of HVDC and FACTS assisted power systems”. In: *Proc. Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, v. 2, pp. 823–829 vol. 2, 2000. doi: 10.1109/PESS.2000.867460.
- [18] KIMBARK, E. W. *Direct Current Transmission*, v. 1. Wiley-Interscience, 1971.
- [19] ARRILLAGA, J. *High Voltage Direct Current Transmission*. Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [20] ARRILLAGA, J., LIU, Y. H., WATSON, N. R. *Flexible Power Transmission: The HVDC Options*. Wiley-Blackwell, 2007.
- [21] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Inc., 1994.

- [22] LOPES, J. C. *Modelagem de Ligações em Corrente Contínua*. Dissertação de mestrado, Wiley-Interscience, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.
- [23] PING, W. W. *Representação de Elos CCAT em Programa Digital de Estabilidade*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.
- [24] JUNIOR, S. V. F. *Modelagem e Simulação de Elos de Transmissão de Corrente Contínua em Estudos de Estabilidade Transitória*. Dissertação de mestrado, UFMG, Mingas Gerais, Brasil, 1984.
- [25] FERNANDES, B. S. *Elos de Transmissão em Corrente Contínua em Programas de Estabilidade Transitória*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [26] PILOTTO, L. A. D. S. *Modelagem de um Elo de Transmissão em Corrente Contínua por Variáveis de Estado e Aplicações de Controle Ótimo*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.
- [27] DE MACEBO, N. J. P. *Análise e Controle da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos de Potência com Elos de Corrente Contínua e Compensadores Estáticos de Reativos*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- [28] CEPEL. *Manual do PACDYN - Análise e Controle de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência*, 2013. V 9.6.2.
- [29] CATTAN, F., MACEDO, N. J. P. “Development and Validation of Madeira Bipole 2 HVDC System Model for the Transient Stability Program ANATEM”, *XIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, 2014.
- [30] CEPEL. *Manual do ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos*, 2015. V10.05.04.
- [31] TAYLOR, C. W. *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill, 1994.
- [32] CIGRE, IEEE. *Guide fog Planning DC Links Terminating at AC System Locations Having Low Shor-Circuit Capacities*. Relatório técnico, jun. 1992. Part II: Planning Guidelines.
- [33] CEPEL. *Manual do ANAREDE - Análise de Redes*, 2015. V10.01.00.

- [34] ONS. *Casos de Referência – Estabilidade – Transitórios Eletromecânicos*. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/avaliacao\\_condicao/casos\\_eletromecanicos.aspx](http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx)>.
- [35] CEPEL. *Manual do ANAFAS - Análise de Faltas Simultâneas*, 2014. V 6.5.1.
- [36] EPE. *Empresa de Pesquisa Energética - Transmissão de Energia*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/Forms/AllItems.aspx>>.
- [37] GOMES, S., AMARAL, T. “Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais do SIN pelo PacDyn utilizando Dados do ANATEM”, *SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, 2012.

# Apêndice A

## Análise Modal

Um sistema elétrico de potência pode ser descrito matematicamente por um conjunto de  $m$  equações algébricas e  $n$  equações diferenciais ordinárias, nas quais o tempo é a variável independente. Além disso, uma equação diferencial de ordem  $n$  pode ser decomposto em  $n$  equações diferenciais de primeira ordem. Utilizando notação vetorial, tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}, t) \\ 0 &= g(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}, t) \\ y &= h(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{u}, t)\end{aligned}\tag{A.1}$$

onde  $\mathbf{x}$  representa o vetor de estados e seus elementos são as variáveis de estado,  $\mathbf{r}$  o vetor das variáveis algébricas e  $\mathbf{u}$  o vetor das variáveis de entrada. Sendo  $f(\cdot)$  o conjunto de equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema,  $g(\cdot)$  o conjunto de equações algébricas relacionadas à rede elétrica e  $h(\cdot)$  as equações que representam as variáveis de saída.

Estas equações podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio do sistema  $(x_0, r_0, u_0)$ , resultando em um sistema de equações lineares chamado de sistema descriptor. Através de manipulações matemáticas, com o intuito de se eliminar as variáveis algébricas do sistema, as equações linearizadas podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \Delta\mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta\mathbf{u} \\ \Delta\mathbf{y} &= \mathbf{C} \Delta\mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta\mathbf{u}\end{aligned}\tag{A.2}$$

onde  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{D}$  são as matrizes de estado, controle, saída e transmissão direta, respectivamente. Através da matriz de estado  $\mathbf{A} = (f_x - f_r g_r^{-1} g_x)$  do sistema, que é formado pelas submatrizes jacobianas do sistema descriptor, pode-se determinar os modos do sistema elétrico que definem o comportamento dinâmico do mesmo, que por sua vez são autovalores da matriz  $\mathbf{A}$ .

Aplicando-se a transformada de Laplace na Equação A.2, obtém-se as equações

de estado no domínio da frequência:

$$\begin{aligned} s\Delta x(s) - \Delta x(0) &= \mathbf{A} \Delta x(s) + \mathbf{B} \Delta u(s) \\ \Delta y(s) &= \mathbf{C} \Delta x(s) + \mathbf{D} \Delta u(s) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

os termos da Equação A.3 podem ser rearranjados, de forma que:

$$\begin{aligned} \Delta x(s) &= \frac{\text{adj}(sI - \mathbf{A})}{\det(sI - \mathbf{A})} [\Delta x(0) + \mathbf{B} \Delta u(s)] \\ \Delta y(s) &= \mathbf{C} \cdot \frac{\text{adj}(sI - \mathbf{A})}{\det(sI - \mathbf{A})} [\Delta x(0) + \mathbf{B} \Delta u(s)] + \mathbf{D} \Delta u(s) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

onde  $I$  é a matriz identidade. Observa-se que o conjunto de equações possui um denominador comum ( $\det(sI - \mathbf{A})$ ). No domínio da frequência, o denominador comum determina os pólos de  $\Delta x(s)$  e  $\Delta y(s)$ , que são as raízes da equação dados por:

$$\det(sI - \mathbf{A}) = 0 \quad (\text{A.5})$$

a equação acima é denominada “equação característica” da matriz de estado do sistema linearizado. Os valores de  $s$  que satisfazem a Equação A.5 são chamados de autovalores da matriz  $\mathbf{A}$ , que a su vez são mais frequentemente designados por  $\lambda$ . Utilizando esta designação a equação pode ser reescrita na forma:

$$(\mathbf{A} - \lambda I) \cdot \phi = 0 \quad (\text{A.6})$$

logo, para cada autovalor  $\lambda_i$  da matriz  $\mathbf{A}$ , existe um vetor  $\phi_i$  que satisfaz a equação, o qual é denominado autovetor à direita da matriz  $\mathbf{A}$  associado ao autovalor  $\lambda_i$ . Da mesma forma, um vetor  $\psi_i$  também pode ser determinado, denominado “autovetor à esquerda” da matriz  $\mathbf{A}$ .

Um par de autovalores complexos conjugados qualquer pode ser escrito por:

$$\lambda = -\zeta\omega_w \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\text{A.7})$$

ou,

$$\lambda = -\sigma \pm j\omega_d \quad (\text{A.8})$$

onde,  $\zeta$  é denominado fator de amortecimento,  $\omega_n$  é denominada frequência natural não amortecida ou frequência complexa,  $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$  é denominada frequência natural amortecida.

É possível mostrar que a resposta livre (sem entradas), no domínio do tempo, de um sistema dinâmico é dada por:

$$\Delta x_i(t) = \phi_{i1}\psi_1 x(0)e^{\lambda_1 t} + \phi_{i2}\psi_2 x(0)e^{\lambda_2 t} + \dots + \phi_{in}\psi_n x(0)e^{\lambda_n t} \quad (\text{A.9})$$

A equação acima mostra que a resposta livre de um sistema é dada por uma combinação linear de  $n$  modos que correspondem aos  $n$  autovalores da matriz de estados, ou seja, a característica dependente do tempo é dada por  $e^{\lambda_n t}$ . E, portanto, a estabilidade do sistema e a evolução de cada modo são determinadas pela natureza dos seus autovalores.

A respostas típicas para as diferentes naturezas dos autovalores são descritas a seguir. **Autovalores reais negativos** correspondem a modos aperiódicos decaindo com o tempo, e o caso contrário a **autovalores reais positivos** caracterizando uma instabilidade aperiódica. **Autovalores complexos com parte real negativa** correspondem a modos oscilatórios amortecidos, e o caso contrário a **autovalores complexos com parte real positiva** caracterizando uma instabilidade periódica. **Autovalores complexos com parte real nula** correspondem a modos oscilatórios de amplitude constante, caracterizando modos condicionalmente estáveis.

Outras propriedades da matriz de estado normalmente empregadas na análise modal são os *mode shapes*, os fatores de participação, os resíduos e os fatores de controlabilidade e observabilidade. As duas primeiras são explicadas a seguir.

As variáveis de estado de um sistema ( $\Delta x(t)$ ) podem ser escritas como o produto da matriz composta pelos autovetores à direita do sistema ( $\Phi$ ) e o vetor de variáveis de estado transformado ( $\gamma(t)$ ), dado por:

$$\Delta x(t) = \Phi \cdot \gamma(t) \quad (\text{A.10})$$

Assim, os autovetores à direita associados a um autovalor da matriz de estado  $\mathbf{A}$  possuem importantes informações sobre as oscilações causadas por este modo, fornecendo os chamados *mode shapes*, e dando uma medida da atividade de uma variável de estado quando um determinado modo é excitado. No caso de sistemas elétricos, normalmente são empregados os *mode shapes* de velocidade dos rotores das unidades geradoras fornecendo informações a respeito das oscilações das máquinas do sistema causadas por um determinado modo de oscilação.

Já os fatores de participação permitem identificar a natureza dos modos de oscilação existentes no sistema, ou seja, cada fator de participação é uma medida da participação de uma variável de estado em um determinado modo presente no sistema. Estes são obtidos do resultado da multiplicação dos autovetores à direita ( $\Phi$ ) e dos autovetores à esquerda ( $\Psi$ ),